

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DO DISPOSITIVO CECO – CONVERSOR DA ENERGIA CINÉTICA DAS ONDAS

DIOGO ROXO PERDIGÃO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

Coorientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

FEVEREIRO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

À Maria

*Success is peace of mind, which is a direct result of self-satisfaction in knowing you did your
best to become the best you are capable of becoming*

John Wooden

AGRADECIMENTOS

Desde o início deste trabalho que o apoio de algumas pessoas se revelou absolutamente decisivo para o sucesso do mesmo, pelo que, é absolutamente justo que expresse publicamente o meu apreço e agradecimento.

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos, orientador do presente trabalho, por toda a ajuda que prestou durante este processo, estando sempre disponível para auxiliar a ultrapassar os problemas e as barreiras que se levantavam. Mas mais do que o conteúdo, quero relevar a forma como o fez. Sempre sensato e compreensível. A ele, deixo aqui o meu sincero obrigado.

Ao Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto, co-orientador da presente dissertação, por ter proporcionado todas as condições para que o trabalho se desenrolasse da melhor forma possível, nomeadamente na ajuda que prestou a ultrapassar questões burocráticas. A ele, o meu muito obrigado.

À D. Esmeralda, pela disponibilidade e por todo o apoio prestado ao longo da realização desta dissertação. A ela, um muito sentido obrigado.

Ao meu pai, que apesar de já não se encontrar entre nós fisicamente, continua a guiar-me pela vida fora. O seu exemplo orienta a minha maneira de ser. Sem ele não seria quem sou. A ele, um enorme obrigado.

À minha mãe, que sempre esteve do meu lado, desde pequeno, a ensinar-me os valores que moldaram a minha personalidade. Sem ela não seria quem sou. A ela, um enorme obrigado.

À Maria, pelo apoio incondicional que tem sido nos últimos dez anos. Um autêntico porto de abrigo, sempre do meu lado, independentemente das circunstâncias. A ela, um enorme obrigado.

Ao Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos (IHRH) e à Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA). A todos os professores que me acompanharam no meu percurso académico. A eles o meu muito obrigado.

RESUMO

A evolução da sociedade atual anda lado a lado com a evolução do pensamento humano, nomeadamente, com a sua capacidade de consciencialização. É no âmbito deste pensamento consciente e responsável que surge a necessidade de, cada vez mais, se procurarem formas alternativas de produção de energia. A evolução tecnológica das últimas décadas tem permitido aumentar, cada vez mais, a capacidade de se desenvolverem soluções mais eficazes e eficientes, nomeadamente no que diz respeito a fontes de produção de energia renovável. De facto, a compreensão de que há recursos energéticos não renováveis, cuja duração não é ilimitada, tem levado a que se procurem fontes alternativas, de entre as quais se têm destacado a energia solar, eólica, geotérmica, das marés, hídrica, da biomassa e das ondas.

É neste enquadramento que se situa a presente dissertação, através do estudo e da análise da viabilidade e do funcionamento do Conversor de Energia Cinética das Ondas – CECO, um dispositivo inovador, registado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), com a patente Nº 105015.

Depois dos trabalhos realizados por Teixeira (2012) e Marinheiro (2013), sobre o referido dispositivo, o objetivo desta dissertação prende-se com a necessidade de passar da modelação física para a modelação numérica. Procurou-se, em primeiro lugar, testar/validar o modelo selecionado e, posteriormente, efetuar a modelação numérica do CECO propriamente dita, terminando com a calibração do modelo numérico utilizado.

O pacote numérico “*ANSYS Academic Research Offshore/Marine*”, também designado simplificada por AQWA, foi a ferramenta utilizada na presente dissertação para atingir os objetivos propostos.

Inicialmente, procurou-se desenvolver dois casos preliminares, relativamente simples e com resultados previamente conhecidos e validados. Este estudo inicial permitiu alcançar a fase seguinte do trabalho, a modelação do CECO propriamente dita, com maior segurança, conhecimento e traquejo, no que à aplicação do software diz respeito, mas também no que concerne às teorias que suportam as abordagens numéricas utilizadas. Foram analisados isoladamente, dois casos, um relativo a estruturas fixas e esbeltas e outro relativo a estruturas flutuantes de dimensões consideráveis. A primeira análise permitiu compreender a forma como o modelo AQWA lida com elementos alongados, para os quais é válida a fórmula de Morison. Apesar de o software possuir todas as capacidades para reproduzir e analisar estes elementos, é importante referir que o mesmo apresenta a limitação de não permitir analisar isoladamente elementos pela fórmula de Morison, quando estes não estão associados a estruturas sólidas. Quanto ao segundo caso, a comparação dos resultados obtidos no AQWA com os resultados previamente validados, obtidos tanto experimentalmente, como com o modelo WAMIT, revelou algumas discrepâncias relativamente ao modo de oscilação de balanço, o que levou a que se estudasse mais detalhadamente a forma como o AQWA lida com as diversas componentes do amortecimento viscoso associado ao modo de balanço, cuja influência no amortecimento total é considerável.

Posteriormente, pretendeu-se criar e simular os principais componentes do CECO, de forma a analisar isoladamente o seu comportamento hidrodinâmico, bem como a sua estabilidade. Destes, o estudo dos módulos laterais móveis e do seu movimento, relativamente ao corpo central fixo, merece, naturalmente, destaque. A realização dos estudos preliminares permitiu efetuar a construção geométrica dos diversos componentes do CECO, a forma como estão ligados entre si, e ainda a malha, quer de cada um isoladamente, quer do conjunto global analisado, de uma forma relativamente simples.

Finalmente, foi ainda possível reproduzir o movimento de translação existente entre o corpo central fixo e as partes móveis, nomeadamente os três tirantes, o que permitiu simular o CECO globalmente, enquanto um conjunto. O presente trabalho ficou completo com a calibração do modelo numérico, através do recurso aos resultados obtidos na última fase de testes efetuados no modelo físico.

Assim, o dispositivo CECO continua a progredir nas suas fases de desenvolvimento, procurando atingir, num futuro relativamente próximo, uma versão otimizada e definitiva.

PALAVRAS-CHAVES: energia das ondas, energias renováveis, CECO, modelação numérica, AQWA.

ABSTRACT

The evolution of societies walks hand in hand with the evolution of human thought, in particular, with its capacity of awareness, responsibility and self-conscious. It is within this conscious thought that, in the last decades, the need to seek alternative forms of energy production has been aroused. With the understanding of the limits of traditional sources of energy, like coal or oil, alongside the technological developments of the last decades, we have been increasingly finding new ways to develop alternative forms of energy, in particular, renewable energy sources, like solar, wind, geothermal, tidal, hydro, biomass and wave energy.

This dissertation fits in this context and aims at analysing the feasibility and the performance of a new wave energy converter, CECO. This device has already been registered at the National Institute of Industrial Property (INPI), patent No. 105015.

Following the work developed by Teixeira (2012) and Marinheiro (2013), the purpose of this dissertation is to effectively evolve, from physical modeling, to the numerical modelling. Firstly, it is essential to test and validate the selected numerical model with results obtained for simplified case studies in previous works. After that, the numerical modeling could be done properly, finishing this dissertation with the calibration of the same model.

The numeric package "ANSYS Academic Research Offshore/Marine", also called AQWA, was the tool used in this dissertation to achieve the proposed objectives.

Initially, two preliminary cases, with previously known and validated results, were simulated and analyzed. This initial study allowed reaching the next phase of the work, the modelling of CECO, with greater security, knowledge and skills, regarding the application of this software, but also with a deeper understanding of the theory behind the numerical approaches used. The first case allowed to understand how AQWA deals with slender elements, to which the Morison formula is applicable. Despite AQWA being capable of fully reproduce and analyze these elements, it is important to say that the software presents the limitation of not allowing the study of these slender elements by themselves, imposing the need to attach them to a volume structure. As for the second case, the comparison of the values obtained in AQWA with those previously validated, both in experimental works and with the model WAMIT, revealed some discrepancies regarding the roll oscillation mode, which led to the study of the way AQWA deals with the different components of the viscous roll damping associated with the roll mode.

Later, the CECO main components were created and simulated, in order to analyze their hydrodynamic behavior, as well as their stability. Of these, the study of the lateral mobile modules, relative to the central fixed body, deserves some natural emphasis. The completion of the preliminary cases allowed creating easily the geometry of the CECO main components, but also the connections between them and the mesh.

Finally, the translational movement between the central fixed body and the mobile parts was created, which allowed simulating the device as a whole. This dissertation was completed with the calibration of the numerical model, using the results obtained in the last phase of tests performed in the physical model.

This way, the device CECO continues to progress in its development stages, trying to reach, in the relatively near future, an optimized and final version.

KEY-WORDS: wave energy, renewable energy, CECO, numerical modeling, AQWA.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA	1
1.3. ENERGIA RENOVÁVEL	2
1.3.1. INTRODUÇÃO	2
1.3.2. ENERGIAS RENOVÁVEIS EM PORTUGAL	4
1.3.3. ENERGIA DAS ONDAS	5
1.3.4. ENERGIA DAS ONDAS EM PORTUGAL.....	9
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	13
2.1. AGITAÇÃO MARÍTIMA	13
2.1.1 INTRODUÇÃO	13
2.1.2 AGITAÇÃO REGULAR	14
2.1.2.1 INTRODUÇÃO	14
2.1.2.2 CELERIDADE E COMPRIMENTO DE ONDA	15
2.1.2.3 VELOCIDADE, ACELERAÇÃO E DESLOCAMENTO DAS PARTÍCULAS DOS FLUIDOS	16
2.1.2.4 ENERGIA DAS ONDAS	19
2.1.3 AGITAÇÃO IRREGULAR	20
2.2. INTERAÇÃO DAS ONDAS COM CORPOS	20
2.2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2.2 INTERAÇÃO DAS ONDAS COM CORPOS FIXOS – FÓRMULA DE MORISON	22
2.2.2.1 INTRODUÇÃO	22
2.2.2.2 FORÇAS DE INÉRCIA.....	22
2.2.2.3 FORÇAS DE ARRASTO	23
2.2.2.4 COMBINAÇÃO DAS FORÇAS	24
2.2.2.5 PARÂMETROS ORIENTADORES DOS COEFICIENTES DE INÉRCIA E DE ARRASTO	24
2.2.2.6 LIMITAÇÕES DA FÓRMULA DE MORISON	27

2.2.2.7 APLICAÇÃO EM CILINDROS INCLINADOS	28
2.2.3 INTERAÇÃO DAS ONDAS COM CORPOS FLUTUANTES	29
2.2.3.1 INTRODUÇÃO	29
2.2.3.2 ANALOGIA COM UM SISTEMA COM UM GRAU DE LIBERDADE	30
2.2.4 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA VS ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO	35
2.2.4.1 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	35
2.2.4.2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO	36
2.2.4.3 TEORIA DAS FUNÇÕES DE RESPOSTA A IMPULSO	36

3. DISPOSITIVO CECO	39
3.1. INTRODUÇÃO	39
3.2. CONSTITUIÇÃO E DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES	40
3.2.1 CONSTITUIÇÃO GERAL	40
3.2.2 MÓDULOS LATERAIS MÓVEIS	43
3.2.3 TIRANTES	43
3.2.4 CORPO CENTRAL FIXO	43
3.3. CLASSIFICAÇÃO DO CECO	44
3.4. PERSPETIVAS DE INSTALAÇÃO	44
3.5. FUNCIONAMENTO	44
3.6. RESUMO DO TRABALHO EFETUADO ANTERIORMENTE	45

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA	55
4.1. INTRODUÇÃO	55
4.2. MÉTODOS DOS PAINÉIS	57
4.3. ANSYS AQWA	57
4.3.1 INTRODUÇÃO	57
4.3.2 PLATAFORMA WORKBENCH	58
4.3.3 ANÁLISE DE ESTRUTURAS ESBELTAS	59
4.3.3.1 INTRODUÇÃO	59
4.3.3.2 RESULTADOS	62
4.3.4 ANÁLISE DE ESTRUTURAS FLUTUANTES	66
4.3.4.1 INTRODUÇÃO	66
4.3.4.2 MASSA ADICIONADA E COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO	68

4.3.4.3 FORÇAS DE EXCITAÇÃO	73
4.3.4.4 MOVIMENTOS OSCILATÓRIOS	75
4.3.4.5 INFLUÊNCIA DA MALHA	76
4.3.4.6 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE	84
4.3.4.7 INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE FREQUÊNCIAS SIMULADAS	87
4.3.4.8 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO	92

5. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO CECO..... 97

5.1. INTRODUÇÃO..... 97

5.2. COMPONENTES SIMULADAS..... 97

5.2.1 INTRODUÇÃO..... 97

5.2.2 MÓDULOS LATERAIS MÓVEIS E LIGADOR SUPERIOR..... 98

5.2.3 ELEMENTO ANELAR ESTRUTURAL..... 99

5.2.4 TIRANTES..... 102

5.2.5 CORPO CENTRAL FIXO..... 103

5.3. REPRODUÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE O CORPO CENTRAL FIXO E OS TIRANTES..... 104

5.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO..... 107

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..... 109

BIBLIOGRAFIA..... 113

ANEXOS..... 117

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - PRODUÇÃO DE ENERGIA TOTAL NUM CENÁRIO MAIS CONSUMISTA (ADAPTADO DO RELATÓRIO DO CME, 2013).....	3
FIGURA 1.2 - PRODUÇÃO DE ENERGIA TOTAL NUM CENÁRIO MAIS SUSTENTÁVEL (ADAPTADO DO RELATÓRIO DO CME, 2013))	4
FIGURA 1.3 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL EM PORTUGAL ENTRE 1999 E 2013 (APREN, 2013 [3])	4
FIGURA 1.4 - EVOLUÇÃO DO PESO DA ENERGIA RENOVÁVEL EM PORTUGAL ENTRE 1999 E 2013 (APREN, 2013 [4]).....	5
FIGURA 1.5 - EXEMPLO DO PELAMIS EM FUNCIONAMENTO.....	7
FIGURA 1.6 - EXEMPLO DO DEXAWAVE EM FUNCIONAMENTO.....	7
FIGURA 1.7 - EXEMPLO DO ANACONDA EM FUNCIONAMENTO.....	8
FIGURA 1.8 - EXEMPLO DO ALBATERN SQUID EM FUNCIONAMENTO, SOB E SOBRE A SUPERFÍCIE DA ÁGUA	8
FIGURA 1.9 - ESQUEMA INTERIOR E FOTOGRAFIA EXTERIOR DO WELLO PENGUIN.....	9
FIGURA 1.10 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO MÉDIO ANUAL DE ENERGIA, POR METRO DE FRENTE DE ONDA, EM kW (GTM, 2009)	9
FIGURA 2.1 - GERAÇÃO DA ONDA (ADAPTADO DE CRES, 2012)	13
FIGURA 2.2 - AS TRÊS ZONAS DE AGITAÇÃO MARÍTIMA (ADAPTADO DE VELOSO GOMES, 2012).)	14
FIGURA 2.3 - ELEMENTOS CARACTERIZADORES DE UMA ONDA (ADAPTADO DE PAREDES, 2008)	15
FIGURA 2.4 - VARIAÇÃO DA DIREÇÃO E DO SENTIDO DA VELOCIDADE E DA ACELERAÇÃO DE UM PONTO DUMA ONDA (ADAPTADO DE MARINHEIRO, 2013).....	18
FIGURA 2.5 - ESQUEMA DE ILUSTRAÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA E DA ENERGIA POTENCIAL DE UMA ONDA.....	19
FIGURA 2.6 - GRAUS DE LIBERDADE DE UM CORPO	21
FIGURA 2.7 ASSOCIAÇÃO DOS FENÓMENOS DA DIFRAÇÃO E DA RADIAÇÃO	21
FIGURA 2.8 - SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE (PONTO S) ENTRE A ZONA ANTERIOR E A ZONA POSTERIOR (ADAPTADO DE PICCININI, 2008).....	23
FIGURA 2.9 - RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA E O NÚMERO DE KEULEGAN-CARPENTER, PARA VÁRIOS VALORES DO NÚMERO DE REYNOLDS (ADAPTADO DE FRIGAARD, 1989).....	25
FIGURA 2.10 - RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE INÉRCIA E O NÚMERO DE KEULEGAN-CARPENTER , PARA VÁRIOS VALORES DO NÚMERO DE REYNOLDS (ADAPTADO DE FRIGAARD, 1989)	25
FIGURA 2.11 - RELAÇÃO O COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA E O NÚMERO DE REYNOLDS, PARA VÁRIOS VALORES DO NÚMERO DE KEULEGAN-CARPENTER (ADAPTADO DE FRIGAARD, 1989)	26
FIGURA 2.12 - RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE INÉRCIA E O NÚMERO DE REYNOLDS, PARA VÁRIOS VALORES DO NÚMERO DE KEULEGAN-CARPENTER (ADAPTADO DE FRIGAARD, 1989).....	26

FIGURA 2.13 - RELAÇÃO ENTRE OS COEFICIENTES DE INÉRCIA E DE RESISTÊNCIA, PARA VÁRIOS VALORES DO NÚMERO DE KEULEGAN-CARPENTER (ADAPTADO DE FRIGAARD, 1989)	27
FIGURA 2.14 - APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE MORISON A CILINDROS INCLINADOS (ADAPTADO DE CHAKRABARTI, 1987).....	28
FIGURA 2.15 - SISTEMA DO TIPO “MASSA-MOLA”, LINEARMENTE AMORTECIDO (ADAPTADO DE CHAKRABARTI, 1987).....	30
FIGURA 2.16 - EXEMPLO BÁSICO DE WEC FLUTUANTE (ADAPTADO DE FALCÃO, 2012)	31
FIGURA 2.17 - OSCILAÇÕES LIVRES DE UM SISTEMA SUB-AMORTECIDO (ADAPTADO DE ROSA SANTOS, 2010).....	34
FIGURA 3.1 - VISTA SUPERIOR DO CECO.....	40
FIGURA 3.2 - VISTA FRONTAL DO CECO	40
FIGURA 3.3 - VISTA LATERAL DO CECO	41
FIGURA 3.4 - VISTA LATERAL DO CECO EM POSIÇÃO DE FUNCIONAMENTO.....	41
FIGURA 3.5 - PERSPETIVA PARA FIXAÇÃO HORIZONTAL DO CECO	41
FIGURA 3.6 - PERSPETIVA PARA SUSTENTAÇÃO VERTICAL DO CECO.....	41
FIGURA 3.7 - PERSPETIVA PARA UNIDADES CECO DE GRANDES DIMENSÕES	41
FIGURA 3.8 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO FUNCIONAMENTO DO CECO, QUANDO É ATINGIDO PELA CAVA (ESQUERDA), E QUANDO É ATINGIDO PELA CRISTA (DIREITA), (ADAPTADO DE MARINHEIRO, 2013).....	41
FIGURA 3.9 - MODELO FÍSICO, À ESCALA GEOMÉTRICA 1/20, CONSTRUÍDO POR TEIXEIRA (2012)	46
FIGURA 3.10 - VISTA FRONTAL DO MODELO FÍSICO, MEDIDAS EM CM (ADAPTADO DE TEIXEIRA, 2012)	47
FIGURA 3.11 - VISTA LATERAL DO MODELO FÍSICO, MEDIDAS EM CM (ADAPTADO DE TEIXEIRA, 2012).....	47
FIGURA 3.12 - MODELO FÍSICO, À ESCALA GEOMÉTRICA 1/20, IMPLANTADO NO TANQUE DE ONDAS (MARINHEIRO, 2013)	49
FIGURA 3.13 - VISTA FRONTAL, MEDIDAS EM CM (ADAPTADO DE MARINHEIRO, 2013)	50
FIGURA 3.14 - VISTA LATERAL, PRIMEIRA FASE DE TESTES, MEDIDAS EM CM (ADAPTADO DE MARINHEIRO, 2013).....	50
FIGURA 3.15 - VISTA LATERAL, SEGUNDA FASE DE TESTES, MEDIDAS EM CM (ADAPTADO DE MARINHEIRO, 2013))	51
FIGURA 3.16 - RESULTADOS OBTIDOS PARA A LARGURA DE CAPTURA RELATIVA POR TEIXEIRA (2012) E POR MARINHEIRO (2013), PARA DIFERENTES NÍVEIS DE AMORTECIMENTO E ESTADOS DE AGITAÇÃO (ADAPTADO DE ROSA SANTOS ET AL, 2014A).	53
FIGURA 4.1 - EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO WORKBENCH.....	58
FIGURA 4.2 - ESQUEMA DO PILAR SIMULADO NO AQWA.....	60
FIGURA 4.3 - PORMENOR DA ESTRUTURA DE SUPORTE DO PILAR	61

FIGURA 4.4 - FORÇA DE INÉRCIA. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DOS CÁLCULOS “MANUAIS”, UTILIZANDO A FÓRMULA DE MORISON, E RESULTADOS PARA A FORÇA DE FROUDE-KRYLOV, OBTIDOS NO AQWA.....	63
FIGURA 4.5 - MOMENTO NA BASE DO PILAR. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DOS CÁLCULOS “MANUAIS”, UTILIZANDO A FÓRMULA DE MORISON, E OS VALORES EXTRAPOLADOS DOS RESULTADOS OBTIDOS NO AQWA.....	64
FIGURA 4.6 - FORÇA DE RESISTÊNCIA. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DOS CÁLCULOS “MANUAIS”, UTILIZANDO A FÓRMULA DE MORISON, E RESULTADOS PARA A FORÇA DE RESISTÊNCIA LINEARIZADA, OBTIDOS NO AQWA.....	64
FIGURA 4.7 - MOMENTO NA BASE DO PILAR. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DOS CÁLCULOS “MANUAIS”, UTILIZANDO A FÓRMULA DE MORISON, E OS VALORES EXTRAPOLADOS DOS RESULTADOS OBTIDOS NO AQWA.....	65
FIGURA 4.8 - FORÇA TOTAL NA BASE DO PILAR. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO CÁLCULO “MANUAL” E NO MODELO AQWA.....	65
FIGURA 4.9 - MOMENTO NA BASE DO PILAR. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO CÁLCULO “MANUAL” E NO MODELO AQWA.....	66
FIGURA 4.10 - ESQUEMA DA BARCAÇA PAINELIZADA, ADAPTADO DE SANTOS (1993).....	67
FIGURA 4.11 - MALHA (2/5) E DIMENSÕES DA BARCAÇA.....	67
FIGURA 4.12 - COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA E DE AMORTECIMENTO PARA O MODO DE AVANÇO. BARCAÇA LIVRE. PROFUNDIDADE 50M.....	69
FIGURA 4.13 - COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA E DE AMORTECIMENTO PARA O MODO DE DERIVA. BARCAÇA LIVRE. PROFUNDIDADE 50M.....	69
FIGURA 4.14 - COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA E DE AMORTECIMENTO PARA O MODO DE ARFAGEM. BARCAÇA LIVRE. PROFUNDIDADE 50M.....	70
FIGURA 4.15 - COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA E DE AMORTECIMENTO PARA O MODO DE BALANÇO. BARCAÇA LIVRE. PROFUNDIDADE 50M.....	70
FIGURA 4.16 - COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA E DE AMORTECIMENTO PARA O MODO DE CABECEIO. BARCAÇA LIVRE. PROFUNDIDADE 50M.....	70
FIGURA 4.17 - COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA E DE AMORTECIMENTO PARA O MODO DE GUINADA. BARCAÇA LIVRE. PROFUNDIDADE 50M.....	71
FIGURA 4.18 - COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA E DE AMORTECIMENTO PARA O ACOPLAMENTO ENTRE O MODO DE AVANÇO E O MODO DE CABECEIO. BARCAÇA LIVRE. PROFUNDIDADE 50M.....	71
FIGURA 4.19 - COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA E DE AMORTECIMENTO PARA O ACOPLAMENTO ENTRE O MODO DE DERIVA E O MODO DE BALANÇO. BARCAÇA LIVRE. PROFUNDIDADE 50M.....	71
FIGURA 4.20 - FORÇA DE EXCITAÇÃO PARA O MODO DE AVANÇO.....	73
FIGURA 4.21 - FORÇA DE EXCITAÇÃO PARA O MODO DE DERIVA.....	73
FIGURA 4.22 - FORÇA DE EXCITAÇÃO PARA O MODO DE ARFAGEM.....	74
FIGURA 4.23 - FORÇA DE EXCITAÇÃO PARA O MODO DE BALANÇO.....	74
FIGURA 4.24 - FORÇA DE EXCITAÇÃO PARA O MODO DE CABECEIO.....	74

FIGURA 4.25 - FORÇA DE EXCITAÇÃO PARA O MODO DE GUINADA.....	74
FIGURA 4.26 - MOVIMENTO DA BARCAÇA LIVRE PARA O MODO DE AVANÇO.	75
FIGURA 4.27 - MOVIMENTO DA BARCAÇA LIVRE PARA O MODO DE DERIVA.....	75
FIGURA 4.28 - MOVIMENTO DA BARCAÇA LIVRE PARA O MODO DE ARFAGEM.	75
FIGURA 4.29 - MOVIMENTO DA BARCAÇA LIVRE PARA O MODO DE BALANÇO.....	75
FIGURA 4.30 - MOVIMENTO DA BARCAÇA LIVRE PARA O MODO DE CABECEIO.	76
FIGURA 4.31 - MOVIMENTO DA BARCAÇA LIVRE PARA O MODO DE GUINADA.	76
FIGURA 4.32 - MALHA SEM COMANDO ASF ATIVADO (ADAPTADO DO ANSYS MESHING INTRODUCTION 15.0).78	
FIGURA 4.33 - MALHA COM COMANDO ASF ATIVADO EM CURVATURE (ADAPTADO DO ANSYS MESHING INTRODUCTION 15.0).....	78
FIGURA 4.34 - MALHA COM COMANDO ASF ATIVADO EM PROXIMITY (ADAPTADO DO ANSYS MESHING INTRODUCTION 15.0).....	79
FIGURA 4.35 - MALHA COM SA DEFINIDO EM COARSE (ADAPTADO DO ANSYS MESHING INTRODUCTION 15.0)	79
FIGURA 4.36 - MALHA COM SA DEFINIDO EM MEDIUM (ADAPTADO DO ANSYS MESHING INTRODUCTION 15.0)	79
FIGURA 4.37 - MALHA COM SA DEFINIDO EM FINE (ADAPTADO DO ANSYS MESHING INTRODUCTION 15.0) ..	80
FIGURA 4.38 - MALHA DA BARCAÇA COM A OPÇÃO ADVANCED MESHING.....	80
FIGURA 4.39 - COMPARAÇÃO ENTRE MALHA ORIGINAL E MALHA GERADA NA OPÇÃO ADVANCED MESHING. MASSA ADICIONADA. MODO DE BALANÇO.	81
FIGURA 4.40 - COMPARAÇÃO ENTRE MALHA ORIGINAL E MALHA GERADA NA OPÇÃO ADVANCED MESHING. AMORTECIMENTO. MODO DE BALANÇO.	81
FIGURA 4.41 - COMPARAÇÃO ENTRE MALHA ORIGINAL E MALHA GERADA NA OPÇÃO ADVANCED MESHING. MASSA ADICIONADA. ACOPLAMENTO ENTRE DERIVA E BALANÇO.	82
FIGURA 4.42 - COMPARAÇÃO ENTRE MALHA ORIGINAL E MALHA GERADA NA OPÇÃO ADVANCED MESHING. AMORTECIMENTO. ACOPLAMENTO ENTRE DERIVA E BALANÇO.....	82
FIGURA 4.43 - COMPARAÇÃO ENTRE MALHA ORIGINAL E MALHA GERADA NA OPÇÃO ADVANCED MESHING. FORÇAS DE EXCITAÇÃO. MODO DE BALANÇO.	83
FIGURA 4.44 - COMPARAÇÃO ENTRE MALHA ORIGINAL E MALHA GERADA NA OPÇÃO ADVANCED MESHING. MOVIMENTOS DA BARCAÇA LIVRE. MODO DE BALANÇO.....	83
FIGURA 4.45 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DO Z(COG) A -5 M E A -1.667 M. MASSA ADICIONADA. MODO DE BALANÇO.	84
FIGURA 4.46 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DO Z(COG) A -5 M E A -1.667 M. AMORTECIMENTO. MODO DE BALANÇO.	85
FIGURA 4.47 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DO Z(COG) A -5 M E A -1.667 M. MASSA ADICIONADA. ACOPLAMENTO ENTRE MODO DE DERIVA E MODO DE BALANÇO.	85
FIGURA 4.48 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DO Z(COG) A -5 M E A -1.667 M. AMORTECIMENTO. ACOPLAMENTO ENTRE MODO DE DERIVA E MODO DE BALANÇO.	86

FIGURA 4.49 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DO Z(COG) A -5 M E A -1.667 M. FORÇAS DE EXCITAÇÃO. MODO DE BALANÇO.....	86
FIGURA 4.50 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DO Z(COG) A -5 M E A -1.667 M. MOVIMENTOS DA BARCAÇA LIVRE. MODO DE BALANÇO.....	87
FIGURA 4.51 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DE DOZE E DE CINQUENTA VALORES DE FREQUÊNCIA. FORÇAS DE EXCITAÇÃO. MODO DE BALANÇO.	88
FIGURA 4.52 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DE DOZE E DE CINQUENTA VALORES DE FREQUÊNCIA. FORÇAS DE EXCITAÇÃO. MODO DE CABECEIO.	88
FIGURA 4.53 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DE DOZE E DE CINQUENTA VALORES DE FREQUÊNCIA. FORÇAS DE EXCITAÇÃO. MODO DE GUINADA.	89
FIGURA 4.54 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DE DOZE E DE CINQUENTA VALORES DE FREQUÊNCIA. MOVIMENTOS DA BARCAÇA LIVRE. MODO DE BALANÇO.	89
FIGURA 4.55 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DE DOZE E DE CINQUENTA VALORES DE FREQUÊNCIA. MOVIMENTOS DA BARCAÇA LIVRE. MODO DE CABECEIO.	89
FIGURA 4.56 - COMPARAÇÃO ENTRE CONSIDERAÇÃO DE DOZE E DE CINQUENTA VALORES DE FREQUÊNCIA. MOVIMENTOS DA BARCAÇA LIVRE. MODO DE GUINADA.	90
FIGURA 4.57 - REPRESENTAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE PICO PARA O MODO DE OSCILAÇÃO DE BALANÇO.	91
FIGURA 4.58 - TRECHO DA SÉRIE TEMPORAL DOS MOVIMENTOS DA BARCAÇA. DIREÇÃO DE ONDA INCIDENTE = 135 °. AGITAÇÃO REGULAR. H = 2 m; T = 10 s.....	93
FIGURA 4.59 - TRECHO DA SÉRIE TEMPORAL DOS MOVIMENTOS DA BARCAÇA. DIREÇÃO DE ONDA INCIDENTE = 135 °. AGITAÇÃO IRREGULAR. HS = 2 m; TP = 10 s.....	95
FIGURA 4.60 - TRECHO DA SÉRIE TEMPORAL DOS MOVIMENTOS DA BARCAÇA. DIREÇÃO DE ONDA INCIDENTE = 135 °. AGITAÇÃO IRREGULAR. HS = 4 m; TP = 12 s.....	96
FIGURA 5.1 - DIMENSÕES DOS MLM'S.	98
FIGURA 5.2 - MALHA DOS MLM'S.	98
FIGURA 5.3 - LIGAÇÃO RÍGIDA ENTRE OS DOIS MLM'S, ATRAVÉS DO ELEMENTO LINEAR.	99
FIGURA 5.4 - SECÇÃO TRANSVERSAL DO LIGANTE SUPERIOR.....	99
FIGURA 5.5 - ELEMENTO ANELAR ESTRUTURAL CONSIDERADO NA MODELAÇÃO FÍSICA (ADAPTADO DE MARINHEIRO, 2013).	100
FIGURA 5.6 - PROJEÇÃO VERTICAL E DIMENSÕES DO ELEMENTO ANELAR.....	100
FIGURA 5.7 - ELEMENTO ANELAR ESTRUTURAL CONSTRUÍDO NO <i>DESIGN MODELER</i>	101
FIGURA 5.8 - LIGAÇÃO ENTRE O ELEMENTO ANELAR ESTRUTURAL E OS MÓDULOS LATERAIS MÓVEIS, PARA UMA INCLINAÇÃO DE 45°.....	101
FIGURA 5.9 - DISTÂNCIAS ENTRE OS TIRANTES E O ELEMENTO ESTRUTURAL. VISTA FRONTAL.....	102
FIGURA 5.10 - SOLIDARIZAÇÃO DOS TIRANTES COM O ELEMENTO ANELAR ESTRUTURAL.	102
FIGURA 5.11 - LIGAÇÃO ENTRE O ELEMENTO ANELAR ESTRUTURAL, OS TIRANTES E OS MÓDULOS LATERAIS MÓVEIS, PARA UMA INCLINAÇÃO DE 45°.	102

FIGURA 5.12 - MALHA CRIADA PARA O CORPO CENTRAL FIXO. INCLINAÇÃO DE 45°	103
FIGURA 5.13 - COMPONENTES DO CECO CONSTRUÍDAS NO DESIGN MODELER	103
FIGURA 5.14 - VISTA FRONTAL DO CECO, COM A RESPETIVA MALHA	104
FIGURA 5.15 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE UMA RIGID JOINT (ADAPTADO DE ANSYS, 2012B).....	105
FIGURA 5.16 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DO MOVIMENTO DE ROTAÇÃO CRIADO, PARA REPRODUZIR O MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO.....	105
FIGURA 5.17 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE UMA HINGED JOINT (ADAPTADO DE ANSYS, 2012B)	106
FIGURA 5.18 - COMPARAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS ENTRE O MODELO FÍSICO E O MODELO NUMÉRICO	108

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 1.1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DA INSTALAÇÃO DE WEC'S EM PORTUGAL (CRUZ E SARMENTO, 2004)	10
QUADRO 1.2 - WEC'S INSTALADOS EM PORTUGAL	10
QUADRO 3.1 - FASES DE DESENVOLVIMENTO DE WEC'S (ADAPTADO DE TEIXEIRA, 2012)	39
QUADRO 3.2 - LISTAGEM DAS COMPONENTES DO CECO (ADAPTADO DE TEIXEIRA, 2012).....	42
QUADRO 3.3 - SÍNTESE DOS TESTES REALIZADOS POR TEIXEIRA (2012).....	46
QUADRO 3.4 - DIFERENÇAS NA GEOMETRIA DO MODELO (VALORES DE PROTÓTIPO)	48
QUADRO 3.5 - CONDIÇÕES DE TESTE NA PRIMEIRA FASE DE ESTUDO (ADAPTADO DE MARINHEIRO, 2013)	48
QUADRO 3.6 - CONDIÇÕES DE TESTE NA SEGUNDA FASE DE ESTUDO (ADAPTADO DE MARINHEIRO, 2013).....	49
QUADRO 4.1 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS FORÇAS E MOMENTOS OBTIDOS ATRAVÉS DOS CÁLCULOS EM EXCEL.....	62
QUADRO 4.2 - ADIMENSIONALIZAÇÃO DOS COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA E DE AMORTECIMENTO.	68
QUADRO 4.3 - ADIMENSIONALIZAÇÃO DAS FORÇAS DE EXCITAÇÃO.....	73
QUADRO 4.4 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA COM A OPÇÃO ADVANCED MESHING	78
QUADRO 4.5 - CONDIÇÕES DE TESTES PARA ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO	92
QUADRO 4.6 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES OBTIDOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E NO DOMÍNIO DO TEMPO, PARA OS MODOS DE ARFAGEM, BALANÇO E CABECEIO.....	94
QUADRO 4.7 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES OBTIDOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E NO DOMÍNIO DO TEMPO, PARA A FREQUÊNCIA MÁXIMA, PARA OS MODOS DE ARFAGEM, BALANÇO E CABECEIO.	94
QUADRO 5.1 – COMPARAÇÃO DA AMPLITUDE DOS MOVIMENTOS ENTRE O MODELO FÍSICO E O MODELO NUMÉRICO.....	109
QUADRO 5.2 – VALORES DEFINIDOS NO AQWA, PARA O ATRITO E O AMORTECIMENTO.....	109

Símbolos e Abreviaturas

Nesta seção apresenta-se uma listagem dos símbolos e abreviaturas utilizados na redação desta dissertação. Ocasionalmente, é possível que o mesmo símbolo apresente diferentes significados, uma vez que o número de fórmulas, variáveis e parâmetros utilizados é bastante extenso. No entanto, o uso desses símbolos estará, por norma, limitado ao contexto em que está inserido, sendo por isso relativamente simples distinguir o seu significado.

Letras Latinas Maiúsculas

A - amplitude da onda [m]

B – coeficiente de amortecimento linear das oscilações [Ns/m]

B_C – coeficiente de amortecimento crítico [Ns/m]

C – celeridade [m/s]

C_0 – celeridade em profundidade infinita [m/s]

C_A – coeficiente de massa adicionada [-]

C_D – coeficiente de arrasto [-]

C_M – coeficiente de inércia [-]

E_c – energia cinética da onda [J]

E_p – energia potencial da onda [J]

E_t – energia total da onda [J]

F_D – força de resistência [N]

F_{DL} – força de resistência linearizada [N]

F_I – força de inércia [N]

FE – comprimento do *fetch* [m]

F'_K – força de excitação adimensionalizada segundo o modo k [-]

H – altura de onda [m]

\bar{H} – altura de onda média do registro [m]

H_s - altura de onda significativa [m]

K – rigidez da mola [N/m]

KC – número de Keulegan-Carpenter [-]

K_{xx} – raio de giração segundo a direção x [m]

K_{yy} – raio de giração segundo a direção y [m]

K_{zz} – raio de giração segundo a direção z [m]

L - comprimento de onda [m]

L_0 - comprimento de onda em profundidade infinita [m]

L_g - comprimento de onda do grupo [m]

Re – número de Reynolds [-]

S_t - número de Strouhal [-]

T - período de onda [s]

T_n – período natural de oscilação [s]

\bar{T} - período médio do registo [s]

T_{cava} - período da cava [s]

T_{crista} - período da crista [s]

T_p - período de onda de pico

T_s - período de onda significativo [s]

U - velocidade do escoamento [m/s]

X'_K – movimento oscilatório adimensionalizado do corpo flutuante [-]

Letras Latinas Minúsculas

a_x – aceleração das partículas fluídas na direção x [m/s^2]

a_z – aceleração das partículas fluídas na direção z [m/s^2]

a'_{jj} – massa adicionada adimensionalizada segundo a componente j [-]

a'_{kk} – massa adicionada adimensionalizada segundo a componente k [-]

b'_{jj} – coeficiente de amortecimento adimensionalizado segundo a componente j [-]

b'_{kk} – coeficiente de amortecimento adimensionalizado segundo a componente k [-]

d – profundidade da água [m]

d_{mk} – distância entre um painel e o painel adjacente [m]

f – frequência de onda [s^{-1}]

f_d – força de excitação [N]

f_{hs} – força hidrostática [N]

f_r – força de radiação [N]

f_p – frequência de pico [s^{-1}]

g – aceleração gravítica [m/s^2]

k – número de onda [-]

m – massa do fluido [Kg]

n – constante empírica de Elias, P.

r_{fm} – raio do painel [-]

t – tempo [s]

u – velocidade horizontal das partículas fluídas [m/s]

u_F – velocidade transversal das partículas fluídas [m/s]
 u_s – velocidade transversal da estrutura [m/s]
 u_{rq} – raiz quadrada da velocidade relativa [m/s]
 u_x – velocidade das partículas fluídas na direção x [m/s]
 u_y – velocidade das partículas fluídas na direção y [m/s]
 u_z – velocidade das partículas fluídas na direção z [m/s]
 v – velocidade vertical das partículas fluídas [m/s]
 x – posição na horizontal de um ponto da onda [m]
 z – posição na vertical de um ponto da onda [m]

Letras Gregas Maiúsculas

Δp – diferencial de pressão entre a crista e cava [Pa]
 Δ_{SM} – área do painel m [m]
 Δ_{SK} – área do painel adjacente [m]

Letras Gregas Minúsculas

α – fator de linearização da força de resistência de Morison [-]
 β – número de Valensi [-]
 γ – fator de escala da massa volúmica [-]
 ε – parâmetro de largura de banda espectral [-]
 η – elevação da superfície livre [m]
 $\bar{\eta}$ – elevação média da superfície livre [m]
 θ – fase [rad]
 λ – fator de escala [-]
 ξ – fator de amortecimento [-]
 ξ_x – deslocamento das partículas fluídas na direção x [m]
 ξ_z – deslocamento das partículas fluídas na direção z [m]
 ρ – massa volúmica da água [kg/m³]
 ω – frequência angular [rad/s⁻¹]
 ω_d – frequência natural de oscilação num sistema com amortecimento [rad/s⁻¹]
 ω_n – frequência natural de oscilação num sistema sem amortecimento [rad/s⁻¹]
 ϕ – potencial da onda [m²/s]
 ν – parâmetro de largura espectral [-]

Abreviaturas

AWS – Archimedes Wave Swing

CECO – Conversor de Energia Cinética das Ondas

CEM – Coastal Engineering Manual

CME – Conselho Mundial de Energia

EMEC – European Marine Energy Center

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FRP – Fibre Reinforced Plastic

IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial

JONSWAP – Join Sea Wave Project

LH – Laboratório de Hidráulica

mlm – módulo lateral móvel

mlm's – módulos laterais móveis

NASA – National Aeronautics and Space Administration

OWC – Oscillating Water Column

OWSC – Oscillating Wave Surge Converters

PA – Point-Absorber

PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis

PTO – Power Take Off (Sistema de extração de energia da onda)

RAO – Response Amplitude Operators (Operador de amplitude de resposta / função de transferência)

SHRHA – Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

TRL – Technology Readiness Level (nível de maturidade da tecnologia)

UE – União Europeia

WEC – Wave Energy Converter (Sistema para o aproveitamento da Energia das Ondas)

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Enquadrado numa série de dissertações sobre o Conversor de Energia Cinética das Ondas – CECO, o presente trabalho pretende dar continuidade aos estudos desenvolvidos por Teixeira (2012) e por Marinheiro (2013). Se as duas primeiras teses tiveram como objetivo fundamental o estudo em modelo físico do dispositivo CECO e o consequente melhoramento do mesmo com base nos resultados experimentais obtidos, esta tem como foco principal a modelação numérica desse dispositivo, procurando continuar a progredir nas fases de desenvolvimento de um conversor de energia das ondas (Wave Energy Converter - WEC, ver 3.1).

Registado com a patente número 105015, o CECO apresentou um desempenho promissor nos testes efetuados anteriormente (Teixeira, 2012 e Marinheiro, 2013), com resultados interessantes e que revelam, tanto no que diz respeito ao conceito como ao dispositivo, um potencial de crescimento significativo. Assim, o passo seguinte seria passar da modelação física para a modelação numérica, o que se pretende alcançar com o presente trabalho. Para tal, é fundamental conhecer as diferentes abordagens existentes para o estudo da interação entre a agitação marítima e um qualquer corpo, fixo ou flutuante. É ainda decisivo saber manejar eficazmente o modelo numérico selecionado para a simulação do dispositivo, possuir um conhecimento aprofundado dos pressupostos em que se baseia a teoria que o rege e, por fim, ter capacidade para produzir e analisar os resultados que o modelo produz.

Atendendo a estes objetivos e, no que diz respeito aos capítulos introdutórios, esta tese não terá como objetivo repetir a apresentação do trabalho desenvolvido previamente. Todos os conceitos introdutórios serão apresentados, mas nem todos serão desenvolvidos exaustivamente, uma vez que isso foi um dos objetivos das teses anteriores. Assim, recomenda-se a consulta detalhada das teses realizadas por Teixeira (2012) e por Marinheiro (2013). No entanto, quando se atingir a modelação numérica do dispositivo CECO, propriamente dita, será fundamental recordar e interligar todos os resultados obtidos, uma vez que será através da sua comparação com os resultados obtidos no modelo numérico que este poderá ser validado.

1.2 ESTRUTURA

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, começando por um enquadramento geral do tema e terminando com os resultados e as conclusões retiradas deste trabalho, procurando ainda sugerir alguns desenvolvimentos futuros para o dispositivo.

Assim, depois de uma introdução geral no capítulo 1, onde se apresenta a dissertação e se introduz a temática das energias renováveis, mais especificamente a conversão da energia das ondas, no capítulo 2 o objetivo será abordar os pressupostos teóricos relacionados com o tema em estudo, nomeadamente os que regem a agitação marítima, dando especial atenção ao estudo da interação das ondas com corpos, fixos e flutuantes, bem como à dinâmica destes últimos.

O terceiro capítulo consiste na apresentação do dispositivo CECO, nomeadamente na identificação do seu estado de desenvolvimento, procurando focar-se nos melhoramentos introduzidos por Marinheiro (2013), relativamente ao trabalho inicial realizado por Teixeira (2012).

Por sua vez, o capítulo 4 apresenta uma primeira abordagem à modelação numérica. Neste capítulo apresenta-se o software AQWA, da ANSYS, bem como dois casos de estudo preliminares. Este trabalho teve como objetivo facilitar a introdução ao pacote numérico, tendo sido comparados os resultados obtidos com os resultados já validados previamente.

O quinto capítulo é o cerne da dissertação, onde se desenvolve a modelação numérica do CECO propriamente dita, nomeadamente a simulação do dispositivo, a validação com resultados do modelo numérico e a simulação das novas condições.

Por fim, as conclusões pretendem resumir o trabalho desenvolvido, tal como os desenvolvimentos futuros procuram indicar o caminho ainda a percorrer no desenvolvimento do dispositivo.

1.3 ENERGIA RENOVÁVEL

1.3.1 INTRODUÇÃO

Num conteúdo introdutório e, de forma simples, é possível dividir as diferentes formas de energia renovável em:

- Energia Solar;
- Energia Hídrica;
- Energia Eólica;
- Energia Geotérmica;
- Energia das Ondas e Marés;
- Energia da Biomassa.

Os trabalhos anteriores (Teixeira, 2012 e Marinheiro, 2013) já contêm uma descrição pormenorizada das diferentes formas de energia, pelo que se assumirá nesta altura que o conhecimento sobre as mesmas já se encontra devidamente consolidado. Contudo, importa introduzir minimamente o tema das energias renováveis num contexto histórico e global, que permita perceber de onde se partiu, onde se está e onde se quer chegar.

Em termos históricos, pode-se afirmar que foi a crise do petróleo dos anos setenta que despoletou um crescente investimento no desenvolvimento de formas de energia renováveis, algo que até então merecia muito pouca atenção por parte das organizações governamentais.

No entanto, apesar do crescimento nesta área de investigação, tal não teve reflexos significativos na importância que as energias renováveis possuem dentro do mix energético mundial. De facto, o Conselho Mundial da Energia (CME) concluiu em 2013 que, para além dos grandes aproveitamentos hidroelétricos, o desenvolvimento das energias renováveis tem sido claramente mais lento do que se previu no início dos anos noventa (CME, 2013).

A forte dependência de subsídios governamentais para financiar a investigação nesta área, aliada à dificuldade atual que algumas fontes de energia renovável apresentam para se tornarem rentáveis, explica, em parte, o reduzido crescimento das mesmas, pelo menos quando comparado com as estimativas iniciais. Estas limitações foram exponenciadas na segunda metade da primeira década deste milénio, devido à grave crise económica e financeira que despoletou, principalmente na Europa, afetando países que se viram forçados a reduzir o seu orçamento para a área de investigação.

No entanto e, de acordo com as diretrizes da União Europeia (UE), as energias renováveis desempenham um importante papel nos objetivos propostos pelo CME para os próximos anos, sendo que as suas linhas orientadoras preveem um desenvolvimento em torno de um equilíbrio entre sustentabilidade ambiental, segurança energética e equidade energética (CME, 2013).

Para percorrer esse caminho, a UE definiu dois pilares: eficiência energética e recurso a fontes de energia alternativa. Assim, foi definida a meta dos 20-20-20, ou seja, uma quota de 20% de energias renováveis, 20% de eficiência energética e uma redução de 20% na emissão dos gases de estufa até 2020 [1]. À data de realização da presente dissertação, as previsões apontam para o sucesso no alcance da primeira e da terceira meta, mas levantam dúvidas relativamente ao cumprimento do segundo objetivo [2].

Desta forma, é possível apresentar, através das Figuras 1.1 e 1.2, as previsões do CME para a produção de energia mundial até 2050. A primeira, relativa a um cenário mais consumista e mais anárquico, cujo objetivo será permitir uma maior autonomia no acesso à energia, nomeadamente através da intervenção em países emergentes; e a segunda, contemplando um cenário mais reservado, cujo objetivo principal será alcançar um crescimento mais regulado, suportado e sustentável (CME, 2013).

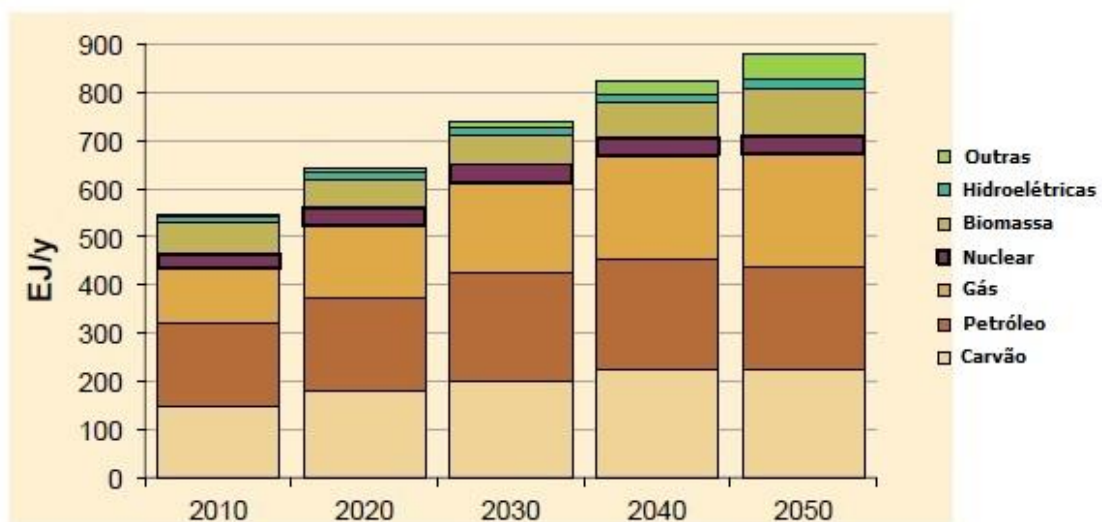


Figura 1.1 – Produção de energia total num cenário mais consumista (adaptado do relatório do CME, 2013)

A unidade energética é apresentada em exa joules por ano. A componente “outras” representa o conjunto entre eletricidade, aquecimento/arrefecimento e transportes.

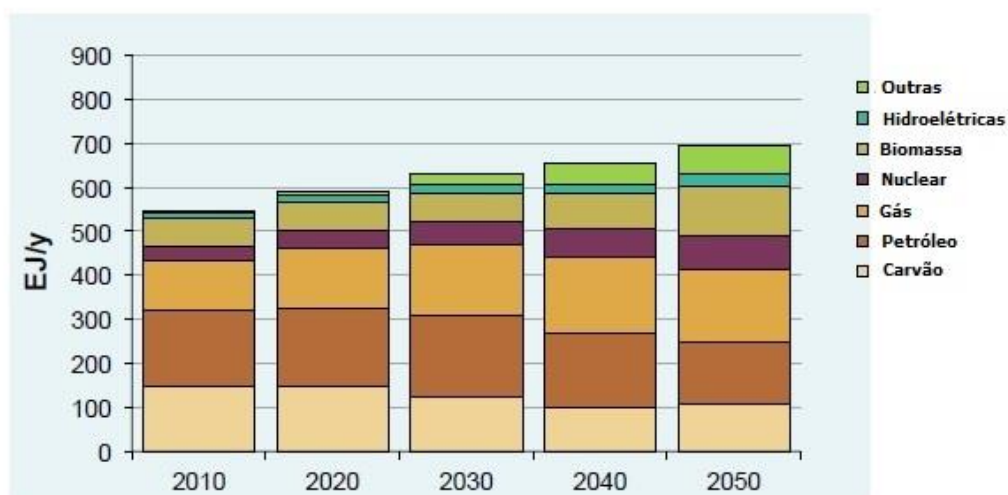


Figura 1.2 – Produção de energia total num cenário mais sustentável (adaptado do relatório do CME, 2013)

1.3.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS EM PORTUGAL

Portugal pode-se considerar como um país geograficamente privilegiado, no que ao aproveitamento de energias renováveis diz respeito, apresentando um enorme potencial de aproveitamento das energias solar, do vento, da biomassa, das marés e das ondas. Com efeito, nos últimos cerca de vinte anos, a influência das energias renováveis no panorama global da produção de energia tem crescido, nomeadamente através do investimento nas hidroelétricas e na energia eólica, conforme se pode verificar pela análise da Figura 1.3 (onde PHC representa as Pequenas Centrais Hídricas).

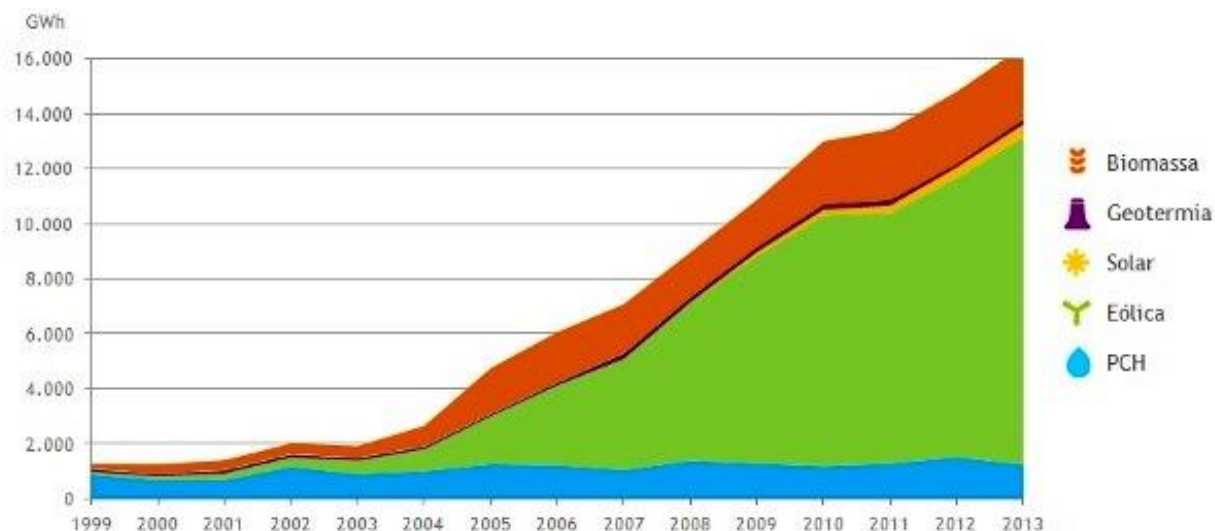


Figura 1.3 – Evolução da produção de energia renovável em Portugal entre 1999 e 2013 (APREN, 2013 [3])

Como consequência, este crescimento de produção implicou um crescimento do peso que as diferentes formas de energia renovável possuem no consumo nacional de energia, como demonstra a Figura 1.4.

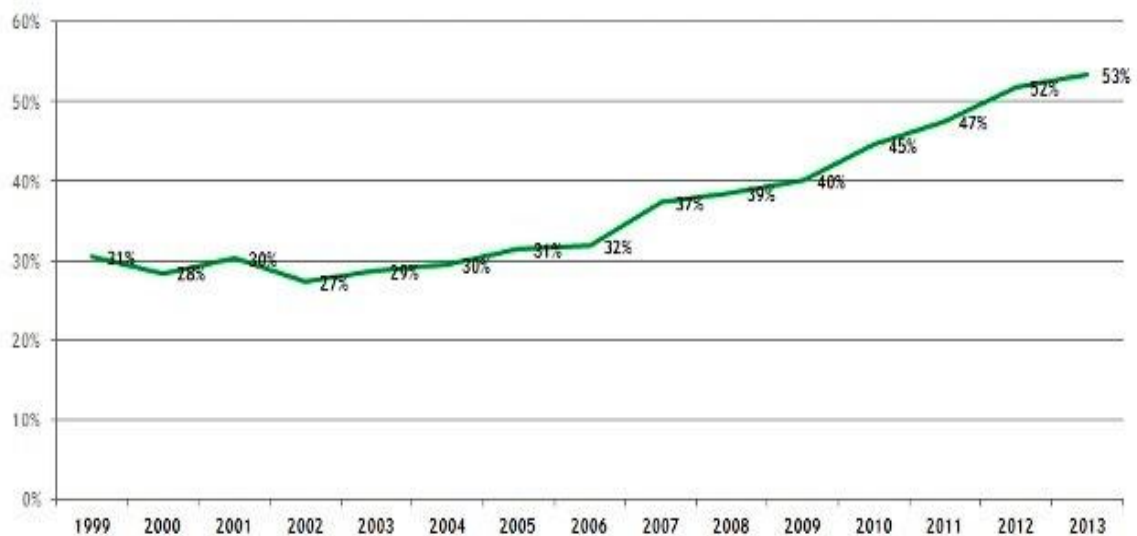


Figura 1.4 – Evolução do peso da energia renovável em Portugal entre 1999 e 2013 (APREN, 2013 [4])

De acordo com as preocupações fundamentais da UE, nomeadamente no que diz respeito à segurança energética, Portugal assumiu um planeamento estratégico, até 2020, com o objetivo principal de reduzir a sua dependência energética, que neste momento se situa nos 79%, acima da média europeia de 54%. Este e outros objetivos estão na base da construção do Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e do Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER).

Em termos de eficiência energética, estes planos apontam como alvo uma redução de 25% no consumo de energia primária. Relativamente à utilização de energia proveniente de fontes endógenas renováveis, a meta situa-se em 31% do consumo final bruto de energia e em 10% no setor dos transportes. Estes objetivos pretendem, para além de reduzir a dependência energética, garantir a segurança de abastecimento [1].

1.3.3 ENERGIA DAS ONDAS

Cerca de dois terços da superfície terrestre está ocupada por oceanos, pelo que o seu potencial de aproveitamento, como fonte de produção de energia, é enorme. A energia contida no movimento das ondas é significativa, apresentando-se como uma fonte de energia renovável que pode ser exponenciada num futuro próximo.

No entanto, esta é ainda uma forma de produção de energia em fase de desenvolvimento, apresentando atualmente um grau de risco elevado, estando por provar um conceito tecnológico efetivamente capaz de se transformar num modelo comercial com rentabilidade atrativa, capaz de competir com outras formas de produção de energia. Assim e, em termos genéricos, pode-se afirmar que as principais barreiras que o desenvolvimento do aproveitamento da energia das ondas tem ainda de ultrapassar, são:

- A forte dependência de subsídios governamentais para a investigação na área de energias renováveis;
- A dificuldade em encontrar um modo eficaz e pouco dispendioso de ligar a energia produzida às redes de energia já instaladas;

- O elevado grau de variabilidade da potência energética presente nas ondas, em diversas escalas de tempo, variando em intervalos curtos (de onda para onda), médios (diferentes estados de agitação) e largos (variações sazonais);
- A dificuldade no desenvolvimento de Power Take Off's (PTO) eficazes;
- A dificuldade em criar WECs robustos capazes de suportar a agressividade do ambiente marítimo em condições extremas de tempestade;

Estas dificuldades, ditas normais neste panorama, devem ser ultrapassadas, de forma a que, num futuro próximo, seja possível a energia das ondas assumir-se como uma alternativa rentável e atrativa para os investidores. À data de realização desta dissertação, é possível estimar-se que, num espaço de um a cinco anos, será possível ter uma visão mais fiável sobre os diferentes conceitos, nomeadamente quais os que podem passar à fase de industrialização e distribuição comercial (Sarmento, 2012). Por seu lado, espera-se que esta distribuição comercial se inicie por volta de 2020, data a partir da qual se deverá assistir à exploração comercial desta forma de energia, com os custos de produção a aproximarem-se dos das restantes formas de produção de energia (Sarmento, 2012).

Perante este cenário de desenvolvimento, é possível afirmar-se que a evolução dos WEC's prende-se fundamentalmente com quatro formas distintas de otimização (SI-OCEAN, 2012):

- Utilização de materiais mais avançados: a maioria dos dispositivos são fabricados em aço, no entanto, têm sido realizados testes para avaliar a viabilidade de utilizar betão armado ou betão reforçado com sistemas compósitos de FRP (materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras) em certos componentes. O FRP apresenta vantagens relativamente ao aço, nomeadamente o seu menor custo, o seu peso reduzido e o seu maior nível de resistência à agressividade do ambiente marítimo, mas os seus limites de resistência ainda não se encontram totalmente compreendidos e dominados, em comparação com o aço.
- Design: neste campo, a evolução prende-se com a necessidade de encontrar um equilíbrio que permita construir um dispositivo robusto, capaz de resistir a condições marítimas e atmosféricas extremas, ao mesmo tempo que mantém a sua eficiência e rentabilidade. O sistema de amarração tem sido classificado como o componente crítico e, consequentemente, aquele que tem sido alvo de maior análise e investigação.
- Custos de instalação: a obrigatoriedade de realizar trabalhos preparatórios no fundo do mar, de modo a garantir a estabilidade do dispositivo, implica custos geralmente elevados, pelo que têm sido estudadas formas de minimizar essas despesas.
- Custos de operação e manutenção: estima-se que estes custos representem cerca de 40% do preço final da energia, o que será fácil de entender se se considerar as condições marítimas e meteorológicas a que os WEC's estão sujeitos (Sarmento, 2012).

Atualmente, é possível identificar, a título de exemplo, dois dispositivos que se encontram num estado de desenvolvimento bastante evoluído, descritos no relatório do Conselho Mundial de Energia de 2013:

- Pelamis (Figura 1.5) – este dispositivo, nomeadamente o P2 (segunda geração), encontra-se em fase de testes de integração na rede elétrica em dois locais distintos, em Orkney, na Grã-Bretanha, pela EMEC (*European Marine Energy Center*) e na costa escocesa, num esforço conjunto da também escocesa *Scottish Power Renewables* e da alemã E-On;



Figura 1.5 – Exemplo do Pelamis em funcionamento

- Dexawave (Figura 1.6) – este dispositivo, de origem dinamarquesa, assemelha-se a uma jangada articulada, com cilindros hidráulicos que oferecem resistência ao movimento entre os diferentes componentes. Inserido no projeto *Aquagen*, do programa da União Europeia FP7, encontra-se numa fase de desenvolvimento do seu PTO, procurando torná-lo mais sustentável a nível ambiental, através da substituição de óleo por água como fluido do sistema hidráulico.

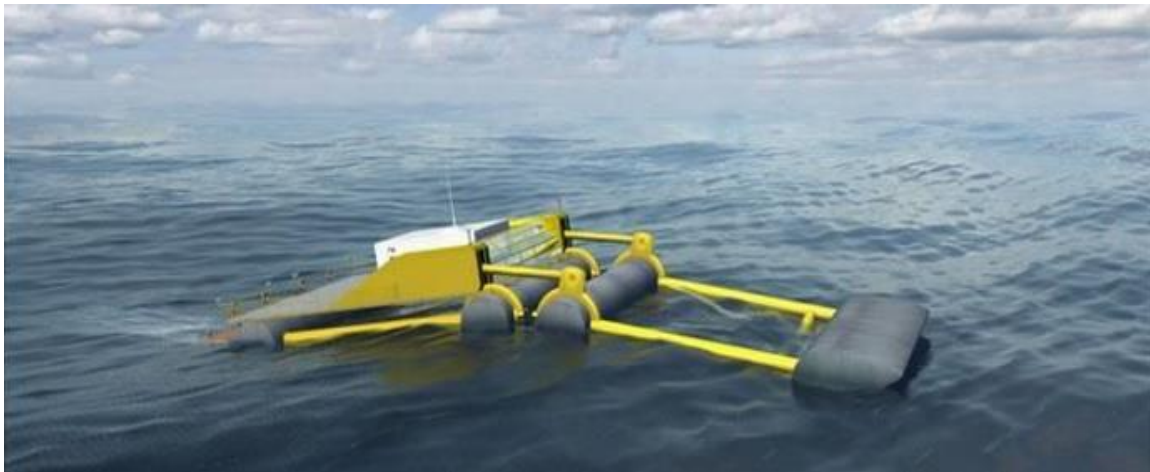


Figura 1.6 - Exemplo do Dexawave em funcionamento

No entanto e, atendendo aos resultados negativos que várias experiências anteriores apresentaram nos últimos trinta anos, têm sido propostas, recentemente, soluções mais radicais e mais arrojadas para o aproveitamento da energia das ondas. O CME (2013) apresenta alguns desses dispositivos inovadores, que têm como objetivo ultrapassar os problemas encontrados pelos seus antecessores:

- Anaconda (Figura 1.7) – desenvolvido pela *Checkmate Seaenergy*, este WEC, cujo conceito de funcionamento se encontra já validado, consiste basicamente num tubo de borracha com água no seu interior, amarrado ao fundo do mar, mas com capacidade para se adaptar consoante a direção da agitação marítima. A pressão provocada no dispositivo pela passagem das ondas implicará a formação de um bojo de água no seu interior que percorrerá o tubo, acumulando energia até atingir um gerador.

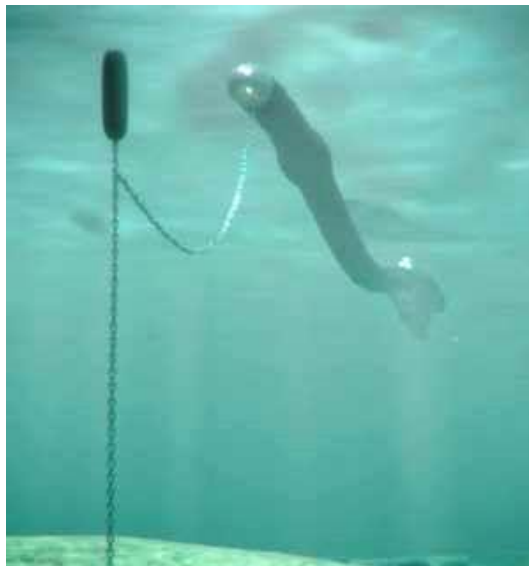


Figura 1.7 - Exemplo do Anaconda em funcionamento

- AlbaTERN Squid (Figura 1.8) – este dispositivo, desenvolvido pela EMEC, em Orkney, na Grã-Bretanha, é constituído essencialmente por um absorvedor flutuante, cujo corpo central é preenchido com água, de forma a que o dispositivo esteja posicionado imediatamente abaixo da superfície de água. Com a passagem das ondas, o absorvedor mover-se-á e, o movimento relativo entre este e os braços articuladores, forçará a bombagem de um fluido hidráulico pelo gerador, produzindo assim energia.

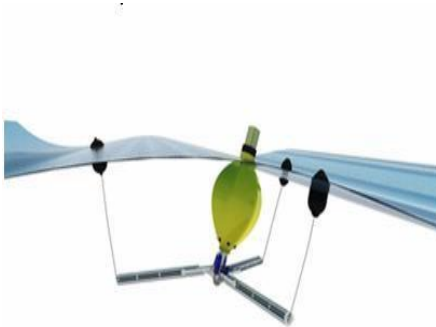


Figura 1.8 - Exemplo do AlbaTERN Squid em funcionamento, sob e sobre a superfície da água

- Wello Penguin (Figura 1.9) – desenvolvido pela finlandesa Wello Oy, este dispositivo pesa cerca de 220 toneladas e tem 30 metros de comprimento, estando amarrado ao fundo do mar através de três cabos. O conceito baseia-se no aproveitamento da energia gerada pelo movimento que a passagem da onda impõe à estrutura, de geometria peculiar. Este movimento acionará o movimento rotacional duma hélice situada no seu interior, que por sua vez fará com que um gerador elétrico produza energia, que será depois transportada até à rede por um cabo submerso.



Figura 1.9 – Esquema interior e fotografia exterior do Wello Penguin

Com o objetivo de complementar o que foi exposto na presente tese, aconselha-se uma leitura completa dos trabalhos anteriores sobre o dispositivo CECO (Teixeira, 2012 e Marinheiro, 2013), assim como a consulta do relatório de 2013 do Conselho Mundial de Energia, de forma a aprofundar o conhecimento de todos os WEC's em fase de desenvolvimento. Sobre isto, pode ainda ser interessante consultar a base de dados *Marine and Hydrokinetic Technology Database*, do governo dos Estados Unidos, onde se pode encontrar e comparar praticamente todos os dispositivos existentes, nomeadamente no que diz respeito ao seu estado de desenvolvimento, ao seu local de testes e às empresas que detêm os direitos de desenvolvimento e comercialização.

1.3.4 ENERGIA DAS ONDAS EM PORTUGAL

No que diz respeito ao aproveitamento da energia das ondas e, apesar das condições de costa extremamente favoráveis, o seu peso é ainda reduzido no cenário da produção nacional. De facto, como é possível verificar pela Figura 1.10, Portugal possui um recurso energético médio-alto, com um fluxo médio anual de energia de cerca de 40kW por metro de frente de onda, o que pode gerar uma produção de energia elétrica anual de aproximadamente 10TWh, ou seja, cerca de 20% do consumo nacional de eletricidade (Cunha e Onofrei, 2008).



Figura 1.10 – Distribuição do fluxo médio anual de energia, por metro de frente de onda, em kW (GTM, 2009)

Neste sentido, Portugal tem investido no desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento desta fonte de energia nos últimos 40 anos, podendo ser considerado um dos países pioneiros na investigação de WEC's. O Quadro 1.1 apresenta as principais vantagens e desvantagens nacionais, no que diz respeito ao desenvolvimento e à instalação destes dispositivos.

Quadro 1.1 – Vantagens e desvantagens da instalação de WEC's em Portugal (Cruz e Sarmento, 2004)

Principais Vantagens	Principais Desvantagens
Condições naturais e estruturais	Falta de experiência em inovação tecnológica
Capacidade científica	Pouca disponibilidade das empresas portuguesas para investirem nesta área
Existência de mercado	Riscos inerentes a uma tecnologia em desenvolvimento
Política governamental favorável	Barreiras técnicas
Capacidade tecnológica e industrial	Imagem pouco favorável dos primeiros sistemas
Exigências comunitárias no panorama das energias renováveis	Complexidade e demora dos processos de licenciamento

No entanto, atendendo a que o mercado mundial das energias renováveis offshore representa cerca de dois milhões de milhões de euros e que, segundo estudos do WavEC Offshore Renewables – Centro de Energia Offshore, Portugal pode alcançar entre 2% a 5% deste mercado, facilmente se compreende a justificação para se continuar a investir nesta área. Os mesmos estudos apontam para uma receita de exportação de energia renovável offshore na ordem dos 5 mil milhões de euros (Sarmento, 2012).

O Quadro 1.2 apresenta os dispositivos já instalados em Portugal. Aconselha-se, de novo, uma leitura atenta do trabalho realizado por Marinheiro (2013), para se conhecer pormenorizadamente o funcionamento e o estado de desenvolvimento destes dispositivos.

Quadro 1.2 – WEC's instalados em Portugal

Dispositivo	Local de Instalação	Data de Instalação	Empresa	Capacidade de Produção Instalada (kW)
Pelamis	Póvoa de Varzim	2008	Enersis / OPE	2250
OWC Pico	Pico, Açores	1999	IST / INE, T&I	400
Waveroller	Peniche	2007	AW-Energy / Eneólica	300
AWS	Póvoa de Varzim	2004	OCEANERGIA	2000

Como facilmente se compreende, o CECO tem ainda um longo caminho a percorrer até poder ser testado em condições de mar reais, sendo que este trabalho pretende dar mais um passo nessa evolução.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 AGITAÇÃO MARÍTIMA

2.1.1 INTRODUÇÃO

O estudo e o desenvolvimento de um dispositivo conversor da energia das ondas, assenta na natureza das solicitações a que este está exposto. De facto, a exposição à agitação marítima, nomeadamente à energia transportada pelas ondas, é o fator decisivo que exponencia potencialidades e, ao mesmo tempo, impõe restrições e condicionalismos na instalação de um qualquer dispositivo. É por isto absolutamente decisivo conhecer e saber caracterizar todas as características associadas à agitação marítima e às teorias que a regulam.

Apesar de ter sido definido que, numa lógica de gestão de recursos e tempo, e atendendo ao contexto onde este trabalho está inserido (referência às teses anteriores), não se iria investir excessivamente na descrição teórica da natureza desta temática, não deixa de ser fundamental abordar as bases que estão por detrás da mesma. Desta forma, importa explicar os conceitos de “agitação regular” e “agitação irregular”.

A ação do vento, com uma determinada velocidade e duração, sobre a superfície de uma massa de água, provoca a agitação da mesma, originando vagas (*Seas*) de período reduzido, aparência irregular e crista curta na zona de geração. A propagação destas para fora deste local implicará uma adaptação, passando a denominar-se por ondulação (*Swell*), apresentando uma menor variabilidade, e um período e crista mais longos. O comprimento da zona de geração, medido na direção de atuação do vento dominante, tem a denominação de *Fetch*, conforme ilustra a Figura 2.1.

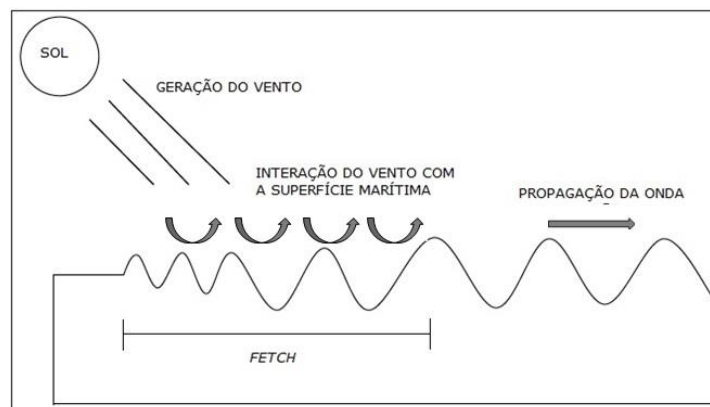


Figura 2.1 – Geração da Onda (adaptado de CRES, 2012)

Depois de formada, a agitação propaga-se em direção à plataforma continental, perdendo alguma energia ao longo da zona de declínio (Marinheiro, 2013). Finalmente, já na plataforma continental, a agitação sofre a influência dos fundos marinhos. As três zonas descritas encontram-se representadas na Figura 2.2, em que d representa a profundidade da água e L representa o comprimento de onda.

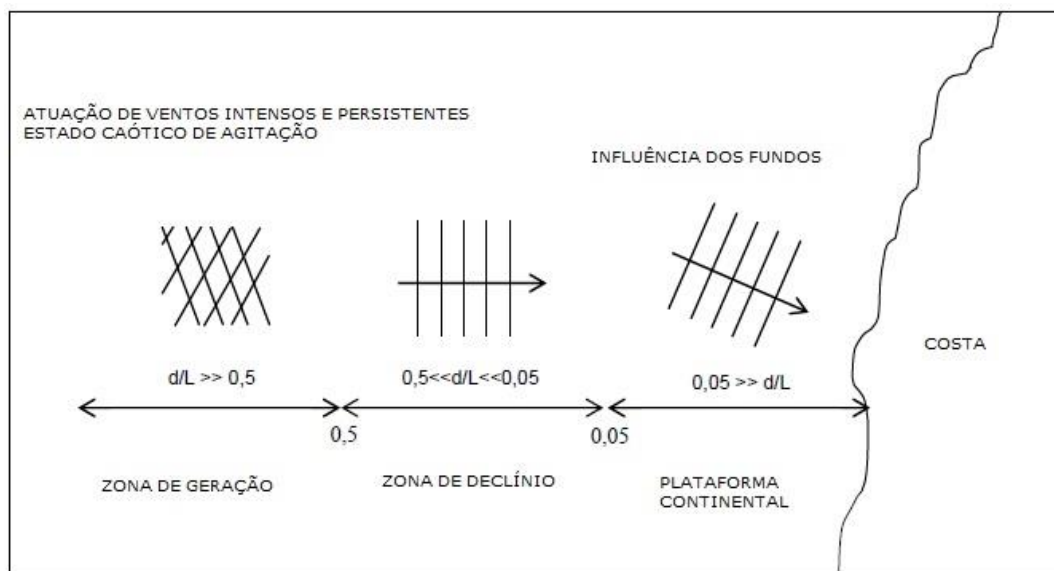


Figura 2.2 – As três zonas de agitação marítima (adaptado de Veloso Gomes, 2012).

2.1.2 AGITAÇÃO REGULAR

2.1.2.1 Introdução

A forma mais elementar de reproduzir os fenómenos de agitação marítima baseia-se na consideração da agitação regular, que pode ser matematicamente representada, entre outras, pela Teoria Linear, ou de Airy. Esta teoria considera a onda como sinusoidal, com movimento oscilatório, ou seja, qualquer partícula de água, sempre que solicitada, tende a voltar à sua posição inicial, sendo o intervalo de tempo que demora a percorrer este ciclo denominado por período da onda (T).

O desenvolvimento da Teoria Linear baseia-se nos seguintes pressupostos:

- O fluido é incompressível, homogêneo e não viscoso;
- A pressão ao longo da superfície livre é uniforme e constante;
- O efeito da tensão superficial e das forças de Coriolis são desprezáveis;
- A forma da onda não varia no tempo e no espaço;
- Ondas com crista e cava bem definidas;
- Ondas de crista longa (2D);
- A amplitude da onda é reduzida;
- A profundidade é elevada;
- O escoamento é irrotacional;
- Os fundos são horizontais e impermeáveis;

Este tema já foi abordado com algum detalhe por Teixeira (2012) e por Marinheiro (2013), estando também perfeitamente explicado no Coastal Engineering Manual (CEM), pelo que não será excessivamente desenvolvido neste trabalho. Importa, no entanto, relembrar alguns conceitos fundamentais relativos ao movimento das partículas de água e às componentes da sua velocidade e aceleração.

Para facilitar a compreensão dos termos utilizados, atenda-se à Figura 2.3, que ilustra alguns parâmetros caracterizadores de uma onda regular, como a altura de onda (H), a amplitude de onda (A), a fase (θ) e a profundidade de água (d).

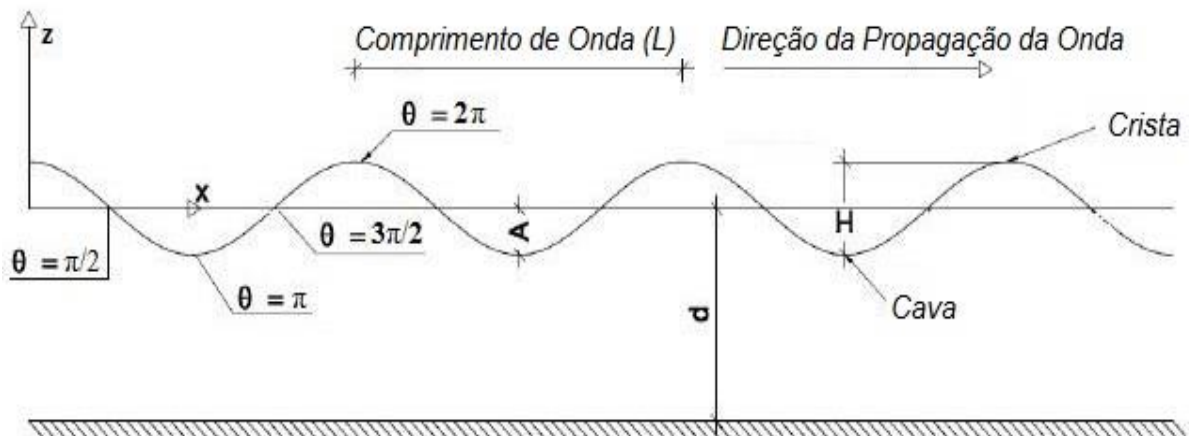


Figura 2.3 – Elementos caracterizadores de uma onda (adaptado de Paredes, 2008)

2.1.2.2 Celeridade e comprimento de onda

Entende-se por celeridade de uma onda a sua velocidade de propagação, podendo ser definida como a razão entre uma distância percorrida por uma determinada fase de onda e o intervalo de tempo em que isso acontece. Assim, a celeridade de uma onda (C) pode ser caracterizada por,

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (2.1)$$

em que L representa o comprimento de onda, ω a frequência angular e k o número de onda.

Com base na teoria linear, pode concluir-se que à medida que a onda se aproxima da costa, é afetada pelos fundos, que são, por norma, cada vez menos profundos. Por seu lado, apesar da variação do comprimento de onda e da celeridade com a profundidade de água, o período de onda mantém-se constante. Em termos teóricos, para profundidades infinitas, o fundo não influencia o cálculo da celeridade e do comprimento de onda, uma vez que estes dependem apenas de T (Demirbilek e Linwood, 2008).

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.2)$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{gL_0}{2\pi}} = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.3)$$

em que L_0 e C_0 representam o comprimento de onda e a celeridade, respetivamente, para profundidades infinitas. No entanto, uma vez que de facto a profundidade não é infinita, esta influencia tanto a celeridade como o comprimento. Assim, tem-se,

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}} \quad (2.4)$$

ou,

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (2.5)$$

A expressão (2.4) é designada como relação de dispersão, uma vez que dela pode concluir-se que ondas de diferentes períodos propagam-se a velocidades diferentes (Marinheiro, 2013). Assim, da relação entre as expressões (2.4) e (2.5) obtém-se a expressão que permite o cálculo do comprimento de onda,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (2.6)$$

Conforme se pode verificar, na expressão (2.6) a incógnita L aparece nos dois termos da igualdade, ou seja, trata-se de uma expressão implícita, em que a única forma de a resolver é através de um processo iterativo.

2.1.2.3 Velocidade, Aceleração e Deslocamento das Partículas dos Fluidos

Assumindo, no estudo bidimensional de propagação de uma onda, que o escoamento é irrotacional, torna-se simples obter as velocidades geradas no fluido, através do gradiente da função potencial de velocidades, ou formulação de Laplace, conforme demonstra a expressão seguinte,

$$\phi(x, y, z) = \frac{gA \cosh(k(z+d))}{\omega \cosh(kd)} \sinh(kx - \omega t) \quad (2.7)$$

em que g representa a aceleração gravítica e x e z a posição de um ponto na onda, na horizontal e na vertical respetivamente.

Derivando esta expressão em ordem às direções x e z e colocando-a em função destas, torna-se possível obter as componentes da velocidade local do fluido segundo cada uma das direções. Sendo a velocidade horizontal, u , e a velocidade vertical v , tem-se,

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{HgT \cosh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{2L \cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos \theta \quad (2.8)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{HgT \sinh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{2L \sinh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin \theta \quad (2.9)$$

Atendendo a que cada ponto de cada onda tem uma determinada fase, θ (por exemplo, as cavas terão sempre o valor de π e as cristas de 2π), pode-se afirmar que, em todos os pontos de um determinado comprimento de onda, existe constância de fase. Assim, se a fase, θ , é constante, também o serão os valores de $\cos \theta$ e de $\sin \theta$. Considerando a aplicação das expressões (2.8) e (2.9) para uma determinada profundidade de água, também os valores de H , d e L serão constantes, pelo que as velocidades podem ser definidas por (Paredes, 2008),

$$u = B_1 \cosh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right) \quad (2.10)$$

$$v = B_2 \sinh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right) \quad (2.11)$$

em que B_1 e B_2 são constantes.

Sabendo que a aceleração é obtida derivando a velocidade em ordem ao tempo, as expressões para o cálculo da aceleração segundo as componentes x (horizontal) e z (vertical), têm a seguinte forma,

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{g\pi H \cosh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{L \cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin \theta \quad (2.12)$$

$$a_z = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{g\pi H \sinh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{L \cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos \theta \quad (2.13)$$

em que a_x representa a aceleração das partículas fluidas na direção x e a_z representa a aceleração das partículas fluidas na direção z .

Atendendo a que a expressão da aceleração resulta da derivação da expressão da velocidade, é possível afirmar que a aceleração varia de forma inversa à velocidade, ou seja, quando esta é máxima, a primeira é nula e vice versa.

A variação da direção e do sentido das velocidades e das acelerações ao longo de um comprimento de onda pode ser esquematizada conforme se apresenta na Figura 2.4.

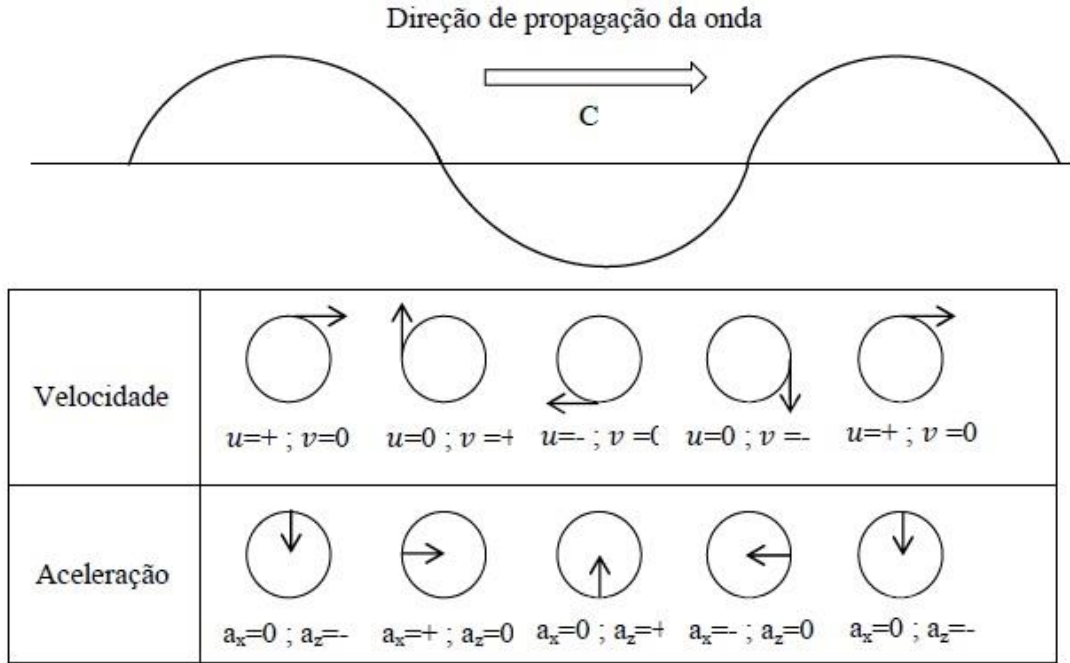


Figura 2.4 – Variação da direção e do sentido da velocidade e da aceleração de um ponto numa onda (adaptado de Marinheiro, 2013)

Relativamente aos deslocamentos das partículas, as equações que os definem segundo as direções, x e z , são obtidas através da integração das expressões das velocidades em ordem ao tempo, desprezando os efeitos de segunda ordem,

$$\xi_x = -\frac{HgT^2}{4\pi L} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(z_0+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin(kx_0 - \omega t) \quad (2.14)$$

$$\xi_z = \frac{HgT^2}{4\pi L} \frac{\sinh\left(\frac{2\pi(z_0+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos(kx_0 - \omega t) \quad (2.15)$$

em que x_0 e z_0 representam as coordenadas da posição média da partícula ao longo de um ciclo, na direção horizontal e vertical respetivamente.

2.1.2.4 Energia das ondas

A energia de uma onda pode ser dividida em duas frações: uma referente à velocidade das partículas associada ao movimento das ondas, a energia cinética, e uma outra que resulta de parte da massa de água se encontrar acima da cava, a energia potencial (Figura 2.5).

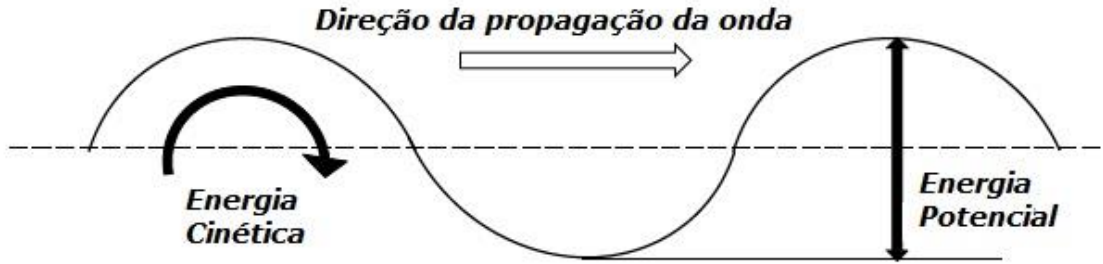


Figura 2.5 – Esquema de ilustração da energia cinética e da energia potencial de uma onda

De acordo com a teoria linear, a energia cinética de uma onda por unidade de largura da crista, pode ser determinada pela seguinte expressão (Demirbilek e Linwood, 2008),

$$E_c = \int_x^{x+L} \int_{-d}^n \rho \frac{u^2 + v^2}{2} dz dx \quad (2.16)$$

em que E_c representa a energia cinética total por unidade de largura da crista da onda e ρ a massa volúmica da água.

Integrando a expressão anterior, ao longo do comprimento de onda e da profundidade da água, obtém-se a seguinte expressão,

$$E_c = \frac{1}{16} \rho g H^2 L \quad (2.17)$$

A energia potencial de uma onda por unidade de largura da crista, pode ser determinada pela seguinte expressão,

$$E_p = \int_x^{x+L} \rho g \left[\frac{(\eta+d)^2}{2} - \frac{d^2}{2} \right] dx \quad (2.18)$$

em que E_p representa a energia potencial total por unidade de largura da crista da onda e η a elevação da superfície livre.

A integração da expressão anterior ao longo do comprimento de onda, origina a seguinte expressão,

$$E_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 L \quad (2.19)$$

Assumindo que a energia potencial é determinada em relação ao nível médio da superfície livre da água, com as ondas a propagarem-se na mesma direção, segundo a teoria de Airy as componentes E_c e E_p são iguais. Assim, a energia total (E_t), pode ser determinada através de,

$$E_t = E_c + E_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 L + \frac{1}{16} \rho g H^2 L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (2.20)$$

2.1.3 AGITAÇÃO IRREGULAR

Ao contrário do que pressupõe a agitação regular, as condições reais da superfície do mar não são de todo regulares. Características como o período, o comprimento, a direção ou a altura da onda, apenas podem ser consideradas e representadas como constantes em laboratório. Na realidade, as ondas geradas pela ação do vento apresentam características irregulares: as ondas não só apresentam diferentes alturas e períodos, como também podem atingir um dado ponto, provenientes de várias direções. Com efeito, a superfície livre do mar apresenta-se habitualmente irregular, tridimensional, e com variabilidade no tempo e no espaço. Matematicamente, podem-se considerar estados de mar aleatórios, como a sobreposição linear de um grande número de componentes regulares.

De facto, durante uma tempestade, um estado de agitação marítima apresenta ondas irregulares de crista curta (*short crested*), com as características indicadas previamente a variarem no tempo ao longo da mesma tempestade, e de ponto para ponto. Também as ondas que se propagam para fora da zona de geração (ondulação, ou *swell*), apesar de apresentarem uma maior constância, assemelhando-se a ondas monocromáticas e de crista longa (*long crested*), têm uma natureza fundamentalmente irregular. Um qualquer estado de agitação, não só pode ser constituído por vagas (*sea*) ou ondulação (*swell*), como também por uma combinação de ambos (Demirbilek e Linwood, 2008).

Para além da irregularidade dos parâmetros acima referidos e, não obstante ser possível antever com alguns dias de antecedência e com um rigor aceitável algumas características da agitação marítima, como o período, a altura de onda significativa ou a direção incidente, outro problema levantado pela agitação marítima prende-se com o seu grau razoável de imprevisibilidade, tornando-se um fenómeno aleatório, sem qualquer lei formulada para o descrever. Assim, a sua caracterização obriga a recorrer a métodos estatísticos, podendo estes ser no domínio do tempo, ou no domínio da frequência.

Cada onda elementar de um registo temporal da elevação da superfície da água é discriminada numa análise no domínio do tempo para, de seguida, se proceder à análise estatística do conjunto. A segunda análise, no domínio da frequência, apesar de partir do mesmo registo temporal, procura fazer o seu tratamento recorrendo às Transformadas de *Fourier*.

2.2 INTERAÇÃO ONDA-CORPO

2.2.1 INTRODUÇÃO

Um corpo tridimensional possui seis graus de liberdade, ou seja, o seu movimento pode ser dividido em seis componentes elementares, associadas a três eixos ortogonais entre si: três movimentos de translação e três de rotação (Figura 2.6). Esses movimentos têm as seguintes designações:

- Avanço (*surge* ou *surging*) – movimento longitudinal de translação no plano horizontal, segundo o eixo dos xx ;
- Deriva (*sway* ou *swaying*) – movimento lateral de translação no plano horizontal, segundo o eixo dos yy ;
- Arfagem (*heave* ou *heaving*) – movimento vertical de translação, segundo o eixo dos zz ;
- Balanço (*roll* ou *rolling*) – movimento de rotação em torno do eixo longitudinal central do corpo, eixo dos xx ;
- Cabeceio (*pitch* ou *pitching*) – movimento de rotação em torno do eixo transversal central do corpo, eixo dos yy ;
- Guinada (*yaw* ou *yawing*) – movimento de rotação em torno do eixo vertical que passa no centro de gravidade do corpo, eixo dos zz ;

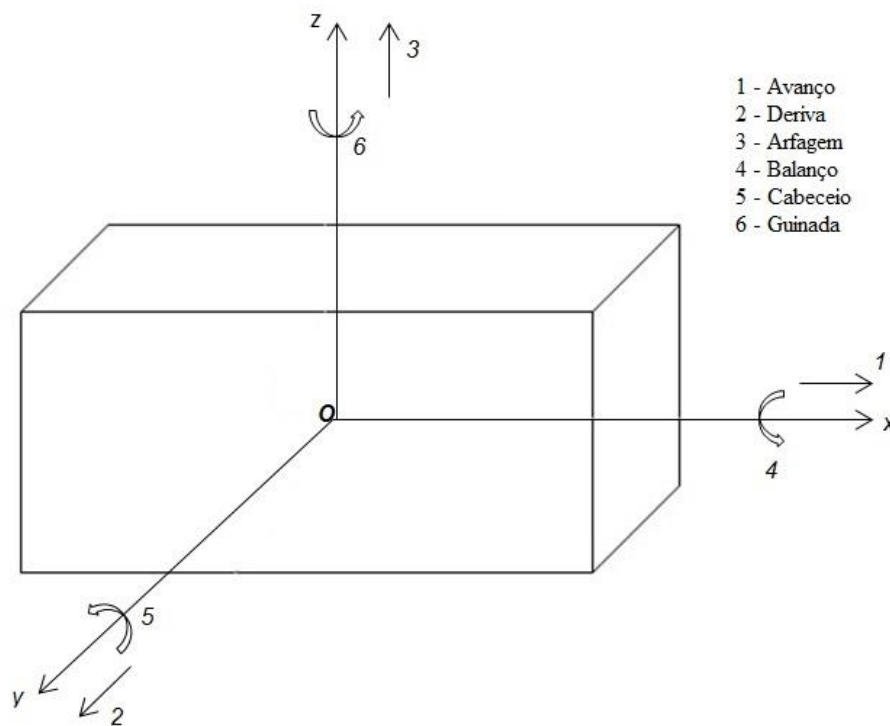


Figura 2.6 – Graus de liberdade de um corpo

Tendo por base o princípio da sobreposição de efeitos (hipótese de *St.Denis-Pierson*), o problema da interação da agitação marítima com um corpo flutuante pode ser decomposto em duas partes, admitindo a linearidade do sistema corpo-onda: uma primeira, onde se aborda o fenómeno da difração, assumindo que o corpo está impedido de se mover; e uma segunda, onde se assume a libertação do mesmo corpo, passando a encarar-se o fenómeno da radiação, provocado pela oscilação forçada do corpo com os movimentos sinusoidais segundo cada um dos seus seis graus de liberdade, em águas inicialmente paradas (Figura 2.7). A hipótese da linearidade do sistema é válida apenas se for assumido que os movimentos do corpo são de amplitude reduzida e da mesma ordem de grandeza da amplitude das ondas, se estas apresentarem pequena declividade e se o escoamento puder ser considerado irrotacional (Santos, 1993).

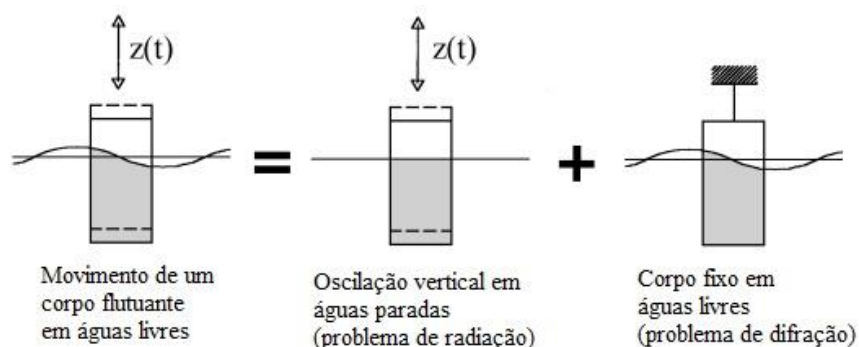


Figura 2.7 – Associação dos fenômenos da difração e da radiação

Assumindo a compreensão inequívoca do fenômeno da radiação, torna-se mais simples introduzir os conceitos de inércia adicionada e de coeficiente de amortecimento, fundamentais para a compreensão da interação entre uma onda e um corpo flutuante.

Precisamente, a resposta de um corpo, depende dos coeficientes hidrodinâmicos, obtidos através da resolução do problema da radiação. As forças e os momentos, resultantes da resolução deste problema, podem ser divididos em duas componentes, uma proporcional à aceleração das partículas de água, as forças de inércia adicionada, e a outra proporcional à velocidade dessas partículas, as forças de amortecimento. As primeiras dificultam o movimento do corpo, tornando-o mais “pesado”, devido à massa de água que é acelerada pelo corpo em movimento, enquanto as segundas serão responsáveis pelo amortecimento desses movimentos, uma vez que existe uma transferência de energia do corpo para as ondas geradas pelo seu movimento (Rosa Santos, 2010).

2.2.2 INTERAÇÃO DA ONDA COM CORPOS FIXOS - FÓRMULA DE MORISON

2.2.2.1 Introdução

Proposta inicialmente por Morison, Johnson, O'Brian e Shaaf, em 1950, a denominada “fórmula de Morison” permite calcular as solicitações que uma onda provoca num corpo fixo, assumindo que as mesmas podem ser decompostas em forças de inércia e em forças de resistência, que são adicionadas linearmente.

A aplicação da fórmula de Morison está limitada a estruturas esbeltas, mais especificamente, quando a relação “diâmetro/comprimento de onda” for menor do que 0,2. Neste caso, considera-se que a presença da estrutura não afeta de forma significativa as características da onda, podendo-se desprezar o efeito da difração (Piccinini, 2008).

2.2.2.2 Forças de Inércia

Assumindo que uma partícula de água transportada numa onda possui uma determinada quantidade de movimento, quando a mesma partícula contorna um cilindro, passa por duas fases, uma primeira de aceleração e, posteriormente, uma de desaceleração. Isto implica que, no momento de transição entre as duas fases, seja realizado trabalho através da aplicação de uma força incremental no cilindro para aumentar essa quantidade de movimento, que é proporcional à aceleração da partícula de água no centro do cilindro (se este não existisse). Esta força é vulgarmente denominada como força de inércia.

A força de inércia por unidade de comprimento (F_I) é composta pela força hidrodinâmica associada à massa adicionada, juntamente com a força de *Froude-Krylov*, que representa a pressão gerada pelo campo de forças do fluido acelerado, podendo ser expressa da seguinte forma,

$$F_I = (M + M_A) \frac{du}{dt} = C_M M \frac{du}{dt} = C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \frac{du}{dt} \quad (2.21)$$

em que M representa a massa do fluido deslocada pelo corpo, $(M+M_A)$ a massa virtual, du/dt a aceleração (teórica) da partícula no centro do cilindro, ρ a massa volúmica do fluido e C_M o coeficiente de inércia, que por sua vez é igual a,

$$C_M = 1 + C_A \quad (2.22)$$

em que C_A representa o coeficiente de massa adicionada.

2.2.2.3 Forças de Resistência

Relativamente ao regime de escoamento em torno de um cilindro, este é comandado pelo número de Reynolds, sendo que a maior parte das estruturas expostas à agitação marítima estão sujeitas a um número de Reynolds bastante elevado. Isto implica que as forças viscosas provenientes do escoamento têm pouca expressão, podendo por isso ser desprezadas. Assim, os efeitos da viscosidade ficam limitados a uma camada superficial, fina, em torno da superfície sólida. Esta assunção permite analisar o escoamento assumindo que o fluido é ideal.

Dito isto, importa clarificar a razão da presença de uma componente de resistência na quantificação global da força. A principal causa para tal prende-se com a existência de uma zona de baixas pressões na zona posterior do cilindro, o que origina um diferencial de pressões entre a zona anterior e a zona posterior do mesmo (Figura 2.8). Este diferencial provoca a geração duma força, exercida no sentido do escoamento, na direção da velocidade instantânea das partículas de água.

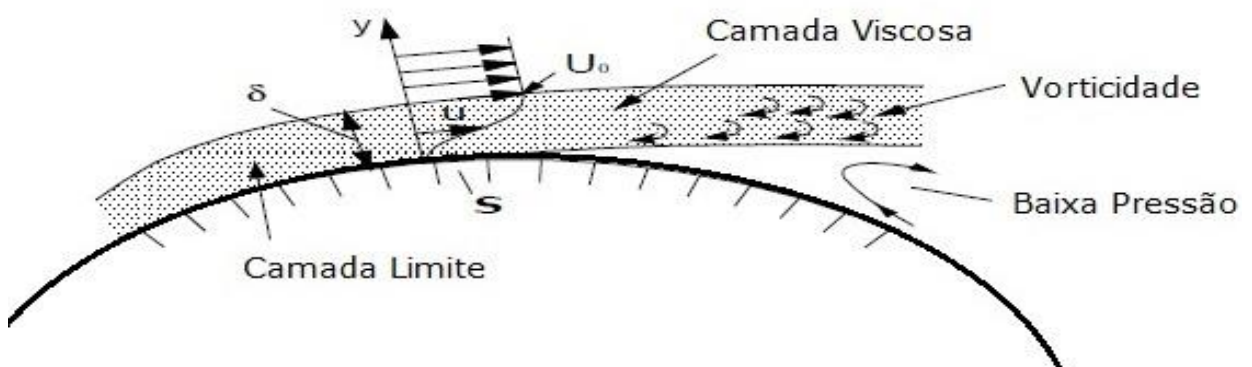


Figura 2.8 – Separação da camada limite (ponto S) entre a zona anterior e a zona posterior (adaptado de Piccinini, 2008)

Interessa ainda salientar que o movimento das partículas de água numa onda é oscilatório, apresentando um dado período, pelo que a zona posterior muda a cada meio ciclo (período).

Assim, a força de resistência por unidade de comprimento (F_D) pode ser caracterizada como,

$$F_D = C_D \cdot \rho \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot u \cdot |u| \quad (2.23)$$

em que C_D representa o coeficiente de resistência, u a velocidade instantânea da partícula de água e A a área do corpo projetada perpendicularmente à direção do escoamento principal. A presença do módulo da velocidade é fundamental para garantir que a força de resistência tem a mesma direção do escoamento.

2.2.2.4 Combinação das Forças

A combinação da força de inércia e da força de resistência permite escrever a equação de Morison, em função duma força por unidade de comprimento do corpo (F),

$$F = C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 dz \frac{du}{dt} + C_D \rho \frac{1}{2} D dz u|u| \quad (2.24)$$

em que $\frac{\pi}{4} D^2 dz$ representa o volume e $D dz$ representa a área projetada, conforme foi referido anteriormente.

A integração da expressão, ao longo do comprimento imerso do cilindro, permite calcular a totalidade da força hidrodinâmica exercida no pilar (Veloso Gomes, 1985).

2.2.2.5 Parâmetros Orientadores dos Coeficientes de Inércia e de Arrasto

As análises e conclusões de Sarpkaya e Issacson (1981), baseadas nos estudos e testes de Keulegan-Carpenter (1958) e de Sarpkaya (1976), permitem afirmar que os coeficientes de inércia (C_M) e de resistência (C_D) dependem do número de Keulegan-Carpenter (KC), do número de Reynolds (Re), da rugosidade do corpo (k/D) e do tempo (t/T),

$$KC = \frac{u_m T}{D} \quad (2.25)$$

$$Re = \frac{u_m D}{\nu} \quad (2.26)$$

$$\beta = \frac{Re}{KC} \quad (2.27)$$

em que u_m representa a velocidade máxima do escoamento, D o diâmetro do cilindro, ν o coeficiente de viscosidade cinemática e β um parâmetro adimensional de frequência, determinado por Sarpkaya (1976).

As Figuras 2.9 a 2.13 ilustram estas conclusões, podendo-se afirmar que os valores de ambos os coeficientes variam usualmente entre 0.8 e 2.0 e ainda que, à medida que C_M cresce, C_D decresce e vice versa.

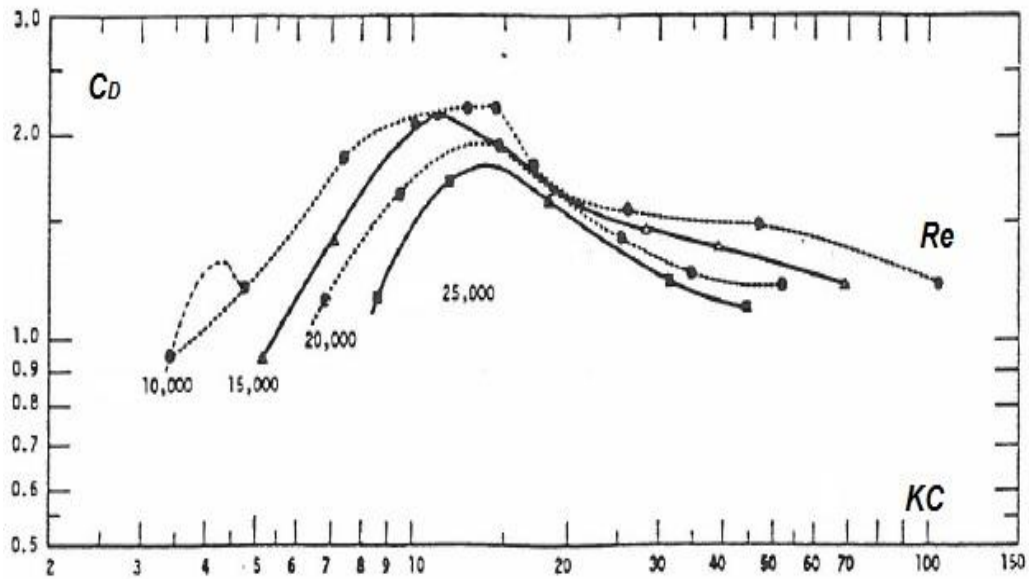


Figura 2.9 – Relação entre o coeficiente de resistência e o número de Keulegan-Carpenter, para vários valores do número de Reynolds (Sarpkaya, 1976)

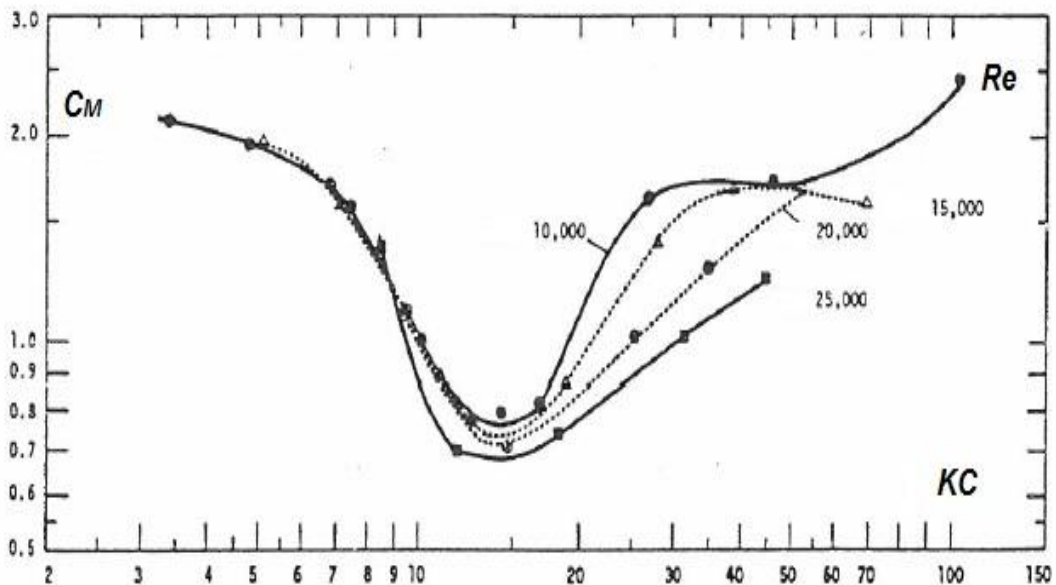


Figura 2.10 – Relação entre o coeficiente de inércia e o número de Keulegan-Carpenter, para vários valores do número de Reynolds (Sarpkaya, 1976)

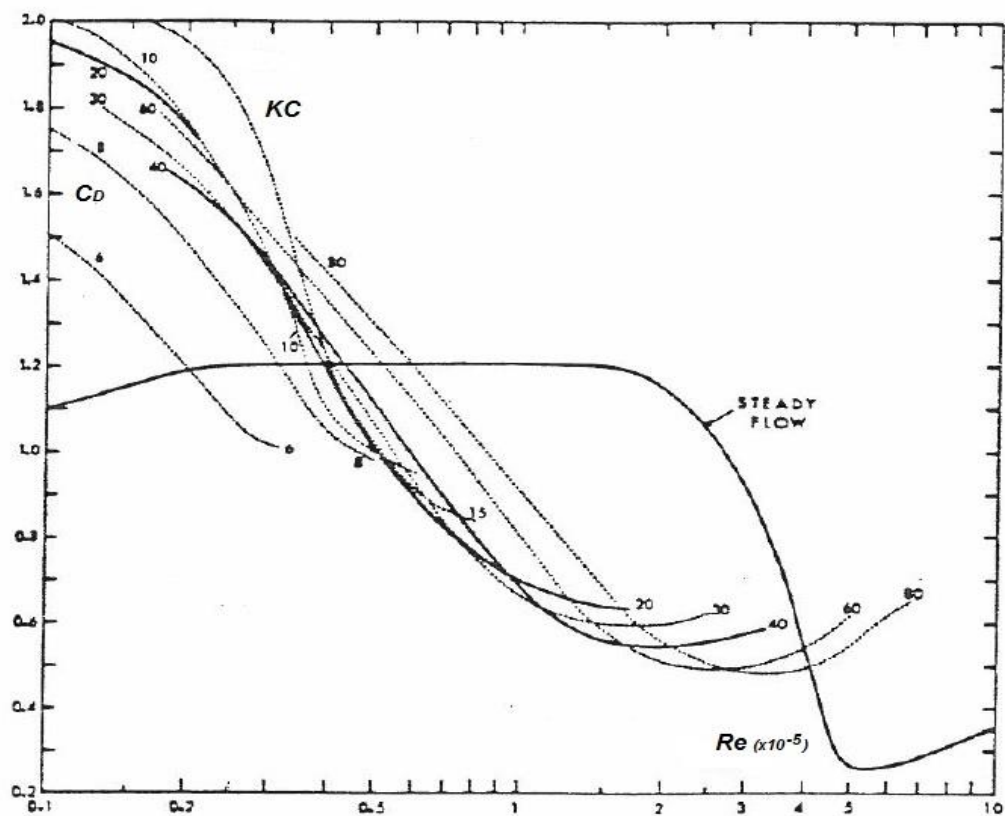


Figura 2.11 – Relação entre o coeficiente de resistência e o número de Reynolds, para vários valores do número de Keulegan-Carpenter (Sarpkaya, 1976)

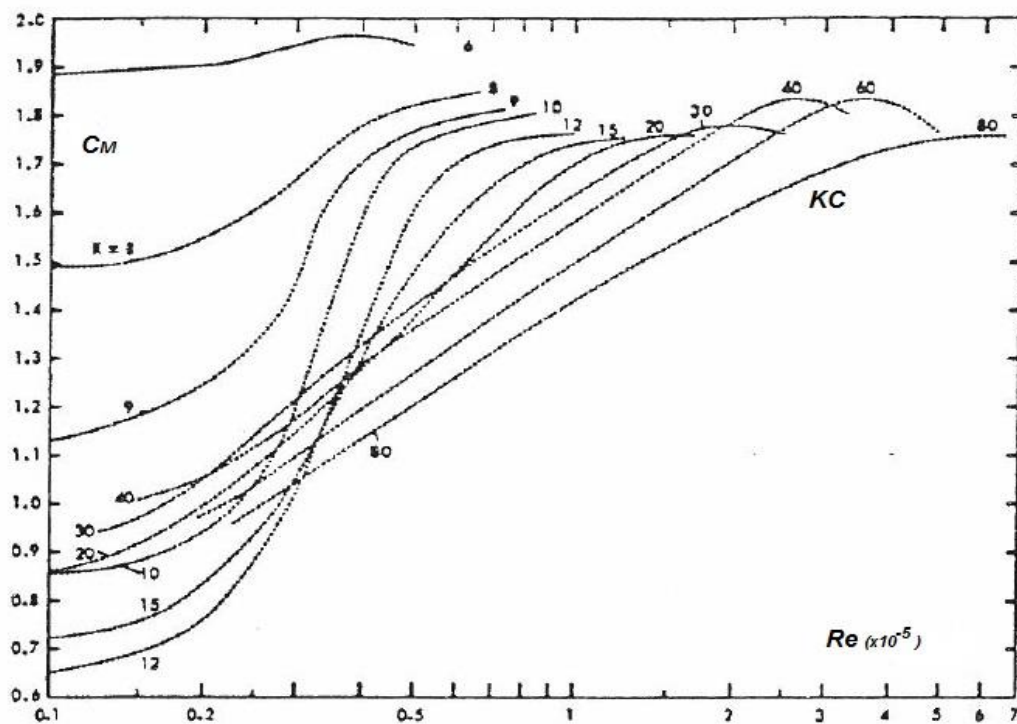


Figura 2.12 – Relação entre o coeficiente de inércia e o número de Reynolds, para vários valores do número de Keulegan-Carpenter (Sarpkaya, 1976)

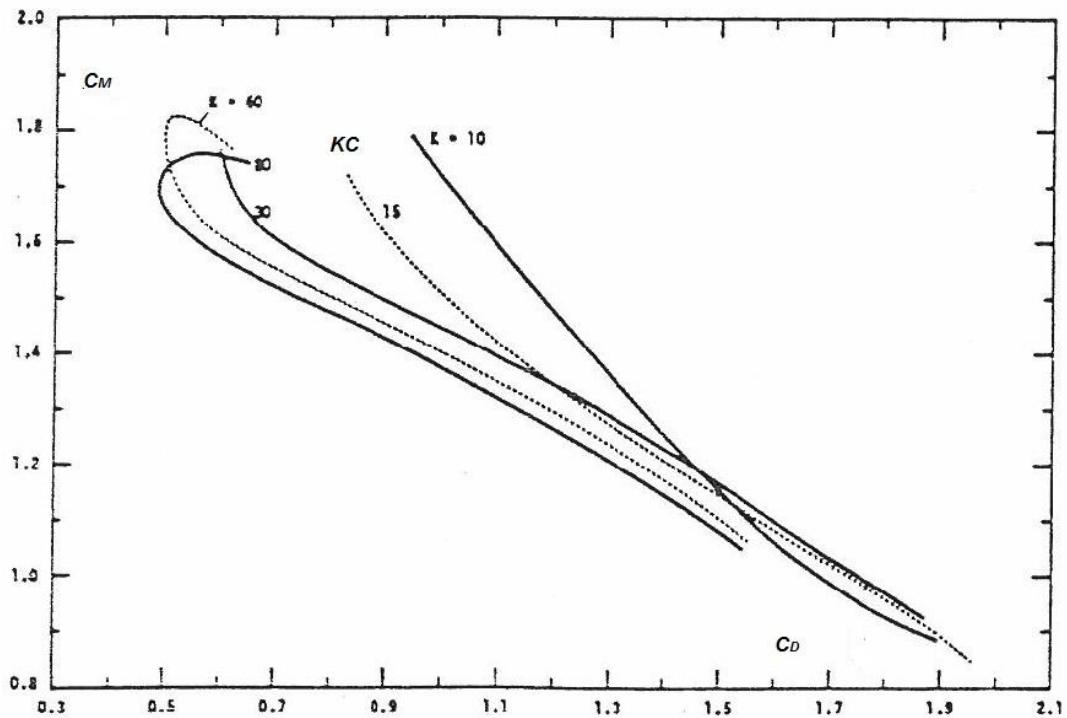


Figura 2.13 – Relação entre os coeficientes de inércia e de resistência, para vários valores do número de Keulegan-Carpenter (Sarpkaya, 1976)

2.2.2.6 Limitações da Fórmula de Morison

A fórmula de Morison é de natureza empírica, caracterizando as forças de inércia e as forças de resistência segundo os seus valores máximos. Esta premissa é claramente questionável, uma vez que está provado que estas variam com o tempo.

A limitação da aplicação desta fórmula a estruturas em que o diâmetro é pelo menos cinco vezes inferior ao comprimento de onda, conforme foi referido em (2.2.2.1), é imposta com o objetivo de garantir que é possível desprezar os efeitos da difração, de modo a que seja possível assumir a aceleração do fluido como constante.

Uma condição fundamental, para a correta utilização da fórmula, prende-se com a disponibilidade de informações sobre as velocidades e as acelerações no domínio do fluido, da mesma forma que é absolutamente decisivo garantir que os coeficientes C_M e C_D são fixados adequadamente, uma vez que os mesmos dependem de diversos parâmetros e variam no tempo, como já foi explicado em (2.2.2.5).

A fórmula de Morison apresenta ainda limitações quando se pretende determinar a força, no domínio do tempo, imposta num cilindro horizontal imerso, no caso de um escoamento multidirecional.

No entanto, apesar de todos os estudos já efetuados no sentido de otimizar a equação, esta continua a demonstrar-se segura e fiável na determinação de forças hidrodinâmicas em estruturas alongadas. A continuidade da sua utilização, na sua formulação original, justifica-se, em primeiro lugar, com as dificuldades presentes na análise teórica e experimental das características do escoamento em redor do corpo, nomeadamente no que à geração de vórtices diz respeito e, em segundo lugar, com a difícil clarificação da relação entre os mecanismos físicos da geração das forças e as características do escoamento (Veloso Gomes, 1985).

2.2.2.7 Aplicação a cilindros inclinados

A equação de Morison é extensível ao estudo de cilindros inclinados (Figura 2.14), através da sua formulação em função dos vetores da velocidade e da aceleração (Borgman, 1958, citado por Chakrabarti, 1987),

$$\vec{F} = C_M \cdot \rho \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \vec{w} + C_D \cdot \rho \frac{1}{2} D \cdot \vec{w} \cdot |\vec{w}| \quad (2.28)$$

em que \vec{w} e \vec{w} representam a componente da velocidade e a componente da aceleração normal ao cilindro inclinado, respetivamente.

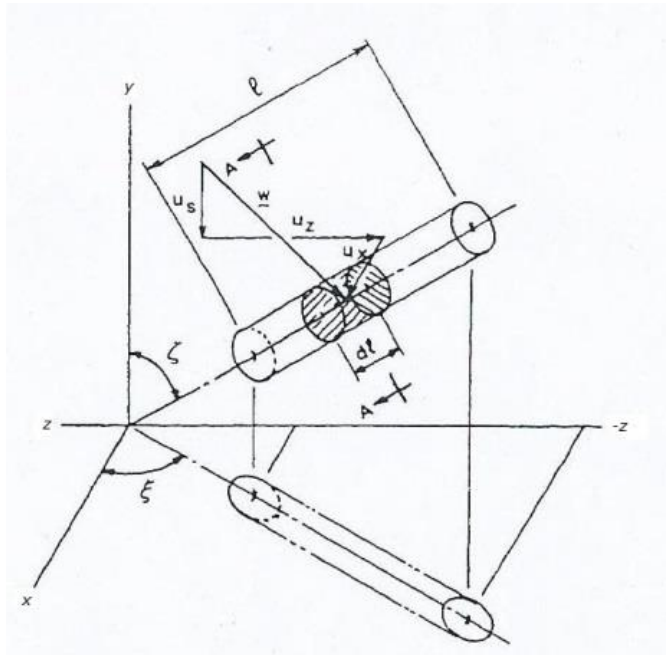


Figura 2.14 – Aplicação da equação de Morison a cilindros inclinados (adaptado de Chakrabarti, 1987)

O vetor \vec{w} pode ser escrito da seguinte forma,

$$\vec{w} = C(u \cdot \vec{i} + v \cdot \vec{j}) \cdot C \quad (2.29)$$

em que C representa o vetor unitário ao longo do eixo do cilindro, de sentido ascendente ou descendente, de forma a que,

$$C = C_x \cdot \vec{i} + C_y \cdot \vec{j} + C_z \cdot \vec{k} \quad (2.30)$$

em que \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} representam os vetores unitários ao longo do eixos cartesianos x , y e z , e u e v representam, respetivamente, as componentes horizontal e vertical da velocidade da partícula.

Desta forma, o vetor \vec{w} pode ser reescrito,

$$\vec{w} = u_x \cdot \vec{i} + u_y \cdot \vec{j} + u_z \cdot \vec{k} \quad (2.31)$$

Consequentemente, também as componentes x , y e z da velocidade podem ser escritas da seguinte forma:

$$u_x = u - C_x(C_x \cdot u + C_y \cdot v) \quad (2.32)$$

$$u_y = v - C_y(C_x \cdot u + C_y \cdot v) \quad (2.33)$$

$$u_z = -C_z(C_x \cdot u + C_y \cdot v) \quad (2.34)$$

O vetor aceleração pode ser obtido derivando em ordem ao tempo, a Equação (2.31):

$$\vec{\dot{w}} = \dot{u}_x \cdot \vec{i} + \dot{u}_y \cdot \vec{j} + \dot{u}_z \cdot \vec{k} \quad (2.35)$$

Desta forma, as forças por unidade de comprimento, num qualquer cilindro inclinado, segundo as direções x , y e z , podem ser obtidas pelas expressões:

$$F_x = C_M \cdot \rho \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \dot{u}_x + C_D \cdot \rho \frac{1}{2} D \cdot |w| \cdot u_x \quad (2.36)$$

$$F_y = C_M \cdot \rho \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \dot{u}_y + C_D \cdot \rho \frac{1}{2} D \cdot |w| \cdot u_y \quad (2.37)$$

$$F_z = C_M \cdot \rho \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \dot{u}_z + C_D \cdot \rho \frac{1}{2} D \cdot |w| \cdot u_z \quad (2.38)$$

2.2.3 INTERAÇÃO DA ONDA COM CORPOS FLUTUANTES

2.2.3.1 Introdução

O estudo da interação das ondas com corpos flutuantes complementa a análise realizada com corpos fixos. Assumindo a libertação do corpo previamente fixo, passará a lidar-se também com o fenómeno da radiação. Desta forma, os movimentos duma estrutura flutuante são influenciados, em primeiro lugar, pelo amortecimento introduzido pela sua interação com a água, estando este diretamente ligado,

principalmente, à energia dissipada através das ondas geradas pela oscilação do corpo e, em segundo lugar, pelo efeito da massa adicionada, que está relacionado com a energia necessária para acelerar as partículas do fluido movimentadas pelo corpo.

Os problemas relacionados com a dinâmica de estruturas flutuantes podem ser abordados através de duas formas distintas (Chakrabarti, 1987): aplicando métodos no domínio da frequência ou no domínio do tempo. A principal limitação da análise no domínio da frequência prende-se com a impossibilidade de processar as não-linearidades existentes na equação do movimento, sendo necessário substituí-las por aproximações lineares. Os termos não-lineares advêm, principalmente, das forças de segunda ordem da agitação marítima, das características não-lineares do sistema de fixação do corpo e das forças de resistência não-lineares. Esta limitação implica que a utilização de análises no domínio da frequência seja limitada a etapas de estudo preliminares, a problemas onde uma solução simplificada seja satisfatória, ou a estudos com intervalo de tempo e número de registos relativamente longos. Por outro lado, a análise no domínio do tempo permite incorporar todas estas não-linearidades, uma vez que resultam da integração numérica das equações do movimento do corpo. No entanto, este tipo de abordagem apresenta a desvantagem de exigir uma capacidade de processamento computacional superior, demorando mais tempo e apresentando soluções usualmente mais complexas e complicadas de interpretar.

2.2.3.2 Analogia com um sistema com um grau de liberdade

Um corpo livre, sujeito à agitação marítima, quando sofre solicitações no plano horizontal (avanço, deriva e guinada), não gera forças nem momentos de restituição, assumindo que o deslocamento do corpo se mantém inalterado. Por outro lado, quando são introduzidos movimentos no plano vertical (arfagem, balanço e cabeceio), estes serão contrariados por forças e momentos que obrigam o corpo a regressar à sua posição de origem, sendo, para pequenas perturbações, a sua grandeza diretamente proporcional à amplitude do movimento imposto ao corpo, a partir da sua posição de equilíbrio (Rosa Santos, 2010).

Uma forma simples de apresentar alguns conceitos relacionados com a dinâmica de corpos flutuantes é considerar uma analogia deste problema com um sistema do tipo “massa-mola” (Figura 2.15), com apenas um grau de liberdade segundo a direção da solicitação introduzida pela força externa, sendo esta equilibrada por forças de inércia, de restituição e de amortecimento (Chakrabarti, 1987).

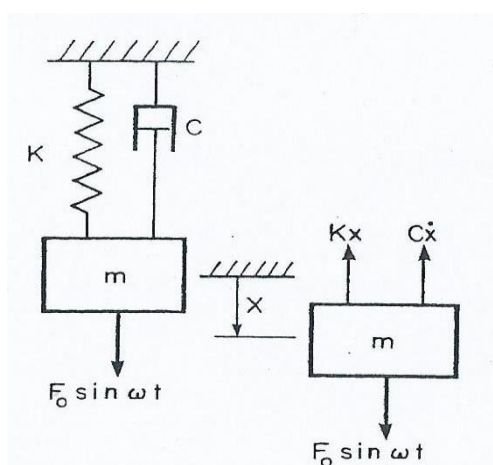


Figura 2.15 – Sistema do tipo “massa-mola”, linearmente amortecido (adaptado de Chakrabarti, 1987)

A equação do movimento pode assim ser escrita da seguinte forma,

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F_0 \sin \omega t \quad (2.39)$$

em que m representa a massa do sistema, B o coeficiente de amortecimento linear das oscilações, K a rigidez da mola, F_0 a amplitude da força externa, com uma frequência angular ω , t a variável tempo e x a coordenada horizontal da oscilação.

De facto, idealizando um dispositivo conversor da energia das ondas (WEC) flutuante, torna-se simples entender a utilidade desta analogia com um sistema do tipo “massa-mola”. Imagine-se um WEC flutuante, na sua forma mais simples, com apenas um grau de liberdade (arfagem), podendo o seu PTO ser reproduzido simplifcadamente por uma mola linear e por um amortecedor linear (Figura 2.16).

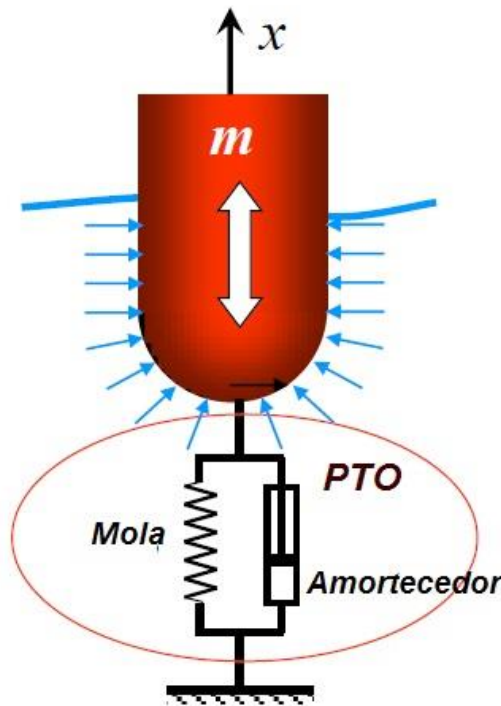


Figura 2.16 – Exemplo básico de WEC flutuante (adaptado de Falcão, 2012)

Atendendo à segunda lei de Newton,

$$\vec{F} = m\vec{a} = m\ddot{x} \quad (2.40)$$

em que m representa a massa do sistema e a a aceleração do mesmo, torna-se possível aplica-la ao exemplo do WEC flutuante, da seguinte forma,

$$f_h(t) + f_m(t) = m\ddot{x} \quad (2.41)$$

em que $f_h(t)$ representa o conjunto da força de radiação (f_r), da força de excitação (f_d) e da força de restituição hidrostática ($f_{hs} = -\rho g S x$), e $f_m(t)$ representa a força introduzida pelo PTO, dependendo da rigidez da mola e do coeficiente de amortecimento introduzido, ou seja,

$$f_m = -Kx - C\dot{x} \quad (2.42)$$

em que x representa a posição do sistema na direção do movimento e K a rigidez do sistema do tipo “massa-mola”.

Sabendo que a força de radiação depende do amortecimento por radiação (B) e da massa adicionada (A), temos que,

$$f_r = -A\ddot{x} - B\dot{x} \quad (2.43)$$

pode-se então reescrever a Equação (2.41), da seguinte forma,

$$f_d - Kx - C\dot{x} - \rho g S x - A\ddot{x} - B\dot{x} = m\ddot{x} \quad (2.44)$$

Colocando a expressão anterior em função da força de excitação (f_d), obtém-se a expressão geral,

$$(m + A)\ddot{x} + (B + C)\dot{x} + (\rho g S + K)x = f_d \quad (2.45)$$

Seguindo a analogia apresentada, van der Molen e Moes (2009) afirmam que um qualquer corpo fixo pode ser analisado como um sistema do tipo “massa-mola”, submetido a uma solicitação externa oscilatória, provocada pela agitação marítima. Neste caso, atendendo à equação (2.45) e, conforme foi demonstrado anteriormente, $m + A$ representa a inércia total do corpo, $B + C$ o amortecimento da sua resposta e $\rho g S + K$ a restituição.

Quando não existem forças externas de excitação, a solução para as solicitações livres do sistema, através da anulação do membro da direita, satisfaz a equação (2.45):

$$(m + A)\ddot{x} + (B + C)\dot{x} + (\rho g S + K)x = 0 \quad (2.46)$$

Isto quer dizer que a solução associada às oscilações livres do sistema representa uma das componentes da solução geral da equação (2.45), tendo a denominação de solução transitória ou complementar.

Considere-se uma solução da equação (2.46), da seguinte forma,

$$x = X e^{qt} \quad (2.47)$$

em que X e q são constantes. Substituindo x na equação (2.40), obtêm-se,

$$X(m'q^2 + B'q + K')e^{qt} = 0 \quad (2.48)$$

em que $m' = m + A$, $B' = B + C$ e $K' = \rho g S + K$, devendo esta equação ser verificada, independentemente do valor de t . Consequentemente, resolvendo a equação (2.42), são obtidos dois valores de q ,

$$q_{1,2} = -\frac{B'}{2m'} \pm \sqrt{\left(\frac{B'}{2m'}\right)^2 - \frac{K'}{m'}} \quad (2.49)$$

Assim, a solução da equação (2.40) pode ser apresentada como,

$$x = A_1 e^{q_1 t} + A_2 e^{q_2 t} \quad (2.50)$$

em que A_1 e A_2 representam constantes arbitrárias, sendo o seu valor determinado com base nas condições iniciais do problema, isto é, da mesma forma como o movimento foi iniciado.

Diz-se que o sistema é criticamente amortecido quando existe apenas um valor de q , ou seja, quando o radical da equação (2.43) é igual a zero. O coeficiente de amortecimento crítico é dado por,

$$B_c = 2\sqrt{Km} \quad (2.51)$$

O fator de amortecimento, ξ , é dado pelo quociente entre o coeficiente de amortecimento e o seu amortecimento crítico,

$$\xi = \frac{B'}{B_c} \quad (2.52)$$

Este fator, ξ , é utilizado para especificar a quantidade de amortecimento de um sistema (Rosa Santos, 2010):

- $\xi=1$: sistema criticamente amortecido;
- $\xi>1$: sistema sobre-amortecido;
- $\xi<1$: sistema sub-amortecido;

Num sistema sem amortecimento, a frequência natural de oscilação, ω_n , é dada por,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K'}{m'}} \quad (2.53)$$

sendo T_n o período natural de oscilação, dado por,

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{\frac{m'}{K'}} \quad (2.54)$$

Assim, tendo por base as relações descritas nas equações (2.45) a (2.47), é possível escrever a equação geral de um sistema de oscilações livres,

$$x = X e^{-\xi \omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \beta) \quad (2.55)$$

em que X e β são determinadas tendo por base as condições iniciais do problema. A frequência natural de oscilação de um sistema com amortecimento, ω_d , é dada por,

$$\omega_d = \sqrt{1 - \xi^2} \omega_n \quad (2.56)$$

A título de exemplo, a Figura 2.17 apresenta as oscilações livres de um sistema sub-amortecido, sendo que os valores máximos e mínimos seguem a curva exponencial presente na primeira parte da equação (2.55).

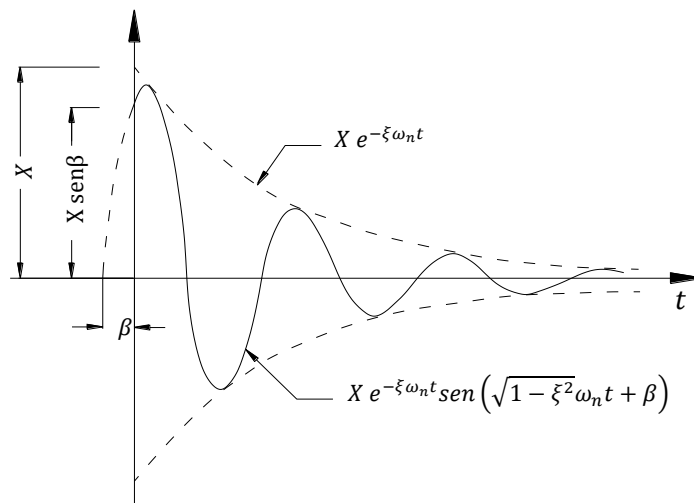


Figura 2.17 – Oscilações livres de um sistema sub-amortecido (adaptado de Rosa Santos, 2010)

A deslocação do corpo da sua posição inicial, segundo a direção do grau de liberdade pretendido, libertando-o de seguida, permite determinar experimentalmente as curvas de decaimento. Posteriormente, as curvas exponenciais serão ajustadas aos registos das oscilações amortecidas do corpo, utilizando, por exemplo, o método dos mínimos quadrados. O período natural e o correspondente amortecimento destas oscilações podem ser obtidos igualando o expoente das curvas referidas a $\xi\omega_n$, utilizando a Equação (2.50).

Chakrabarti (1987), afirma que os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento podem ser calculados a partir dos resultados das experiências de decaimento livre das oscilações do corpo flutuante, em águas paradas, sendo ξ determinado conforme apresentado na Equação (2.46) e C_M obtido por,

$$C_M = \frac{m}{\rho V} - 1 \quad (2.57)$$

em que ρ representa a massa volúmica da água, V o volume de água deslocado pelo corpo flutuante e m pode ser calculado com base na Equação (2.47), sendo conhecidos K e ω_n . Esta metodologia limita o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos à frequência natural do sistema, devido à natureza das experiências de decaimento livre (Rosa Santos, 2010). No entanto, atendendo a que estes coeficientes dependem da frequência da oscilação, Van Oortmerssen (1976), recorreu a métodos experimentais e a equipamentos mais evoluídos, para avaliar corretamente os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento. Outra possibilidade para determinar estes coeficientes seria recorrer à Teoria Linear de difração-radiação, referida previamente.

2.2.4 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA vs ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

2.2.4.1 Análise no Domínio da Frequência

Na sequência do que foi explicado previamente, importa agora abordar o desenvolvimento das equações do movimento de um corpo. Segundo Van Oortmerssen (1976), a Equação (2.46) pode ser apresentada da seguinte forma,

$$(M + a)\ddot{x} + (b)\dot{x} + (c)x = F(t) \quad (2.58)$$

em que a , b e c representam forças de restituição hidrostática e hidrodinâmica. Entenda-se que esta expressão não é verdadeiramente uma equação de movimento, uma vez que relaciona variáveis instantâneas do movimento com valores instantâneos das forças de excitação, pelo que a sua utilização fica restrita à descrição de um movimento oscilatório estacionário, no domínio da frequência (Van Oortmerssen, 1976).

Com efeito e, aceitando que os movimentos do corpo relativamente à sua posição de equilíbrio são de pequena amplitude e que o sistema é linear, as equações do movimento de um corpo, no domínio da frequência, são dadas por,

$$\sum_{j=1}^6 \{(M_{kj} + a_{kj})\ddot{x}_j + b_{kj}\dot{x}_j + c_{kj}x_j\} = F_k, \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.59)$$

em que x_j representa o movimento do corpo segundo o modo de oscilação j , M_{kj} a matriz de massas e de momentos de inércia, a_{kj} a matriz de massas e de momentos de inércia adicionados, b_{kj} a matriz de amortecimento, c_{kj} a matriz de restituição hidrostática e F_k as forças e os momentos exteriores que atuam no corpo, segundo o modo k (Rosa Santos, 2010).

Se todos os coeficientes presentes da equação (2.59) forem praticamente constantes para cada frequência particular do movimento, as seis equações diferenciais referidas podem ser resolvidas no domínio da frequência (Ligteringen e Moes, 2001). Contudo, as forças de restituição do sistema de amarração são, por norma, não-lineares em relação ao deslocamento x , impossibilitando a utilização de uma análise no domínio da frequência, obrigando a recorrer-se a uma análise no domínio do tempo. Desta forma, o termo da equação (2.59) relacionado com o amortecimento do movimento é substituído por uma função de atraso, passando a variável x a ser função do tempo, seguindo uma abordagem baseada em funções de resposta a impulso (Rosa Santos, 2010).

Por uma questão de simplicidade, optou-se por apresentar apenas a formulação para um corpo flutuante, considerando os seus seis graus de liberdade, não contemplando o caso concreto de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas, nomeadamente as implicações colocadas pela presença do PTO.

2.2.4.2 Análise no Domínio do Tempo

Os movimentos do corpo segundo os seus seis graus de liberdade, sob influência de forças externas, podem ser obtidos através da integração, em ordem ao tempo, das equações do movimento na forma proposta por Cummins (1962),

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ (M_{kj} + A_{kj}) \ddot{x}_j(t) + \int_{-\infty}^t R_{kj}(t - \tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + C_{kj} x_j(t) \right\} = F_k, \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.60)$$

em que A_{kj} representa a matriz de inércia adicionada para frequência infinita, R_{kj} as funções de resposta a impulso e, t e τ o tempo.

Esta abordagem de Cummins (1962), assente na teoria das funções de resposta a impulso, é válida apenas na hipótese de os movimentos do corpo serem de pequena reduzida. Esta premissa permite considerar o sistema linear, sendo que esta condição é fundamental para se poder resolver o problema da radiação e determinar a resposta hidrodinâmica do fluido no domínio do tempo.

2.2.4.3 Funções de Resposta a Impulso

Esta teoria, na qual se baseia o método de Cummins (1962), afirma que, quando um corpo é forçado a oscilar em águas inicialmente paradas, as forças e os momentos que nele atuam, em cada instante, refletem a história dos seus movimentos anteriores e não apenas o seu movimento atual. Neste caso, o movimento de um corpo é descrito como uma sucessão temporal de pequenos movimentos impulsivos (Rosa Santos, 2010). Assim, em qualquer instante, a soma das reações a estes movimentos permite obter a força total de reação hidrodinâmica do fluido, considerando-se que cada reação contém um atraso temporal adequado em relação ao instante do deslocamento impulsivo.

Assumindo uma relação linear entre os dados de entrada e os dados de saída e, de acordo com a teoria das funções de resposta a impulso, Cummins (1962), afirma que, se a resposta (R_t) de um determinado sistema a um impulso unitário é conhecida, então a resposta desse sistema a uma força arbitrária (F_t) pode ser calculada através da convolução entre essa força e a função de resposta a impulso, da seguinte forma,

$$\Omega(t) = \int_{-\infty}^t R(t - \tau)F(\tau)d\tau \quad (2.61)$$

A partir desta abordagem proposta por Cummins (1962), torna-se simples demonstrar que as forças e os momentos de reação hidrodinâmica do fluido têm, tal como foi referido na análise do problema de radiação no domínio da frequência, uma componente relacionada com a aceleração instantânea do navio (força de inércia adicionada) e uma componente relacionada com a velocidade (força de amortecimento). Assim, as forças de radiação, $F_K^R(t)$, são escritas como,

$$F_K^R(t) = \sum_{j=1}^6 A_{kj}\ddot{x}_j(t) + \int_{-\infty}^t R_{kj}(t - \tau)\dot{x}_j(\tau)d\tau, \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.62)$$

em que A_{kj} representa a matriz de inércia adicionada para frequência infinita, t e τ o tempo, x_j o movimento do corpo segundo o modo de oscilação j e R_{kj} as funções de resposta a impulso que descrevem a evolução temporal da força generalizada que atua no corpo segundo a direção k , na sequência de um movimento do tipo impulsivo segundo a direção j .

Van Oortmerssen (1976) e de Santos (1993) descrevem, detalhadamente, a equivalência existente entre termos no domínio da frequência e do tempo, relacionando, respetivamente, os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento com os termos da resposta hidrodinâmica do fluido, descritos na Equação (2.62). Esta comparação permite que a metodologia utilizada na resolução dos problemas de difração e radiação no domínio da frequência possa ser empregue na determinação das funções de resposta a impulso e dos coeficientes de inércia adicionada para frequência infinita, tendo por base a técnica das transformadas de Fourier (Rosa Santos, 2010). Assim,

$$R_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_{kj}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2.63)$$

$$A_{kj} = a_{kj}(\omega') + \frac{1}{\omega'} \int_0^\infty R_{kj}(t) \sin(\omega' t) dt \quad (2.64)$$

em que ω representa a frequência angular, ω' um qualquer valor de ω , escolhido arbitrariamente e a_{kj} e b_{kj} os coeficientes de inércia adicionada e de amortecimento, respetivamente. Atendendo a esta separação das componentes da reação hidrodinâmica do fluido, torna-se simples entender a transição da formulação das equações dos movimentos do corpo no domínio da frequência para o domínio do tempo.

Desta forma, é possível resolver, no domínio do tempo, em cada instante, o conjunto de equações diferenciais, baseadas na segunda lei de Newton, que relacionam os valores instantâneos das forças de excitação e dos movimentos provocados no corpo por ação dessas forças, presentes na Equação (2.60).

3

DISPOSITIVO CECO

3.1 INTRODUÇÃO

O CECO, Conversor de Energia Cinética das Ondas, é um dispositivo cujo objetivo é converter a energia cinética e potencial associada ao movimento longitudinal das ondas marítimas, em energia elétrica. Encontra-se, desde 2012, registado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), com o número de Patente Nacional 105015 (Ribeiro, 2012).

Tendo como objetivo uniformizar, clarificar e facilitar a comunicação entre agências investidoras e equipas de desenvolvimento e investigação, o desenvolvimento de um WEC pode ser dividido em cinco fases (Quadro 3.1), desde a validação inicial do conceito até à demonstração final do protótipo.

Quadro 3.1 – Fases de desenvolvimento de WEC's (adaptado de Teixeira, 2012)

Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Validação do Conceito	Projeto do Modelo	Validação das Componentes	Protótipo do Dispositivo	Demonstração do Protótipo
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conceito inicial / Invenção/Patente; ▪ Modelo à Escala 1:25-100; ▪ Testes com ondas regulares e irregulares; ▪ Otimização e configuração da geometria do dispositivo; ▪ Validação de modelos matemáticos; ▪ Primeira estimativa de desempenho do dispositivo para condições de mar realistas; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumento de escala para 1:10-25; ▪ Maior número de parâmetros físicos medidos e condições de teste; ▪ Início de testes com <i>Power Take Off</i> (PTO) realistas; ▪ Testes de sobrevivência; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Finalização dos testes em laboratório e início dos testes em mar num local calmo; ▪ Escala 1:3-10; ▪ Testes PTO prolongados; ▪ Os estudos numéricos devem passar de modelação no domínio da frequência para o domínio do tempo; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Devem estar disponíveis os dados realistas de desempenho, juntamente com os custos de fabricação e instalação; ▪ Escala 1:2-2; ▪ Ligação à rede não é essencial no início mas deve ser considerada no final; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Construção do WEC à escala 1:1 (caso esteja nesta escala na fase 4, é apenas colocado no local para o qual foi projetado); ▪ Ligação à rede e venda de energia;

Conforme foi dito por Holmes e Nielsen (2010), “seguir um plano de desenvolvimento não é a garantia de sucesso, mas não seguir nenhum é provavelmente o caminho para a desilusão, a perda de tempo e o desperdício de recursos”.

Ora, atendendo a esta divisão por fases, é possível afirmar-se que o CECO se encontra, à data de início da presente dissertação, entre as fases 1 e 2. Assim, esta tese terá como objetivo dar seguimento aos trabalhos efetuados por Teixeira (2012) e por Marinheiro (2013), procurando fazer avançar definitivamente o dispositivo para a segunda fase de desenvolvimento.

Com efeito e, conforme uma leitura atenta das dissertações anteriormente referidas poderá comprovar, os trabalhos de desenvolvimento do Conversor de Energia Cinética das Ondas começaram em 2012, por Teixeira, com a construção de um modelo físico simplificado do CECO a partir das especificações do registo de patente, seguindo-se a realização dos primeiros testes experimentais no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica do SHRHA da FEUP. Em 2013, Marinheiro deu sequência ao desenvolvimento do dispositivo, através da construção de um modelo mais realista e eficiente. Desta forma, este trabalho focar-se-á essencialmente no passo seguinte, ou seja, fazendo uso dos resultados obtidos nesses trabalhos experimentais, procurar-se-á calibrar e validar o modelo numérico.

3.2 CONSTITUIÇÃO E DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES

3.2.1 CONSTITUIÇÃO GERAL

As Figuras 3.1 a 3.8 ilustram várias perspetivas do CECO, sendo que o Quadro 3.2 serve de apoio às mesmas, através da apresentação dos componentes com a respetiva legenda.

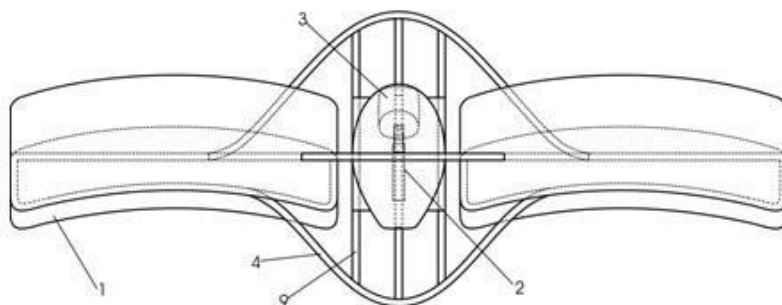


Figura 3.1 - Vista superior do CECO

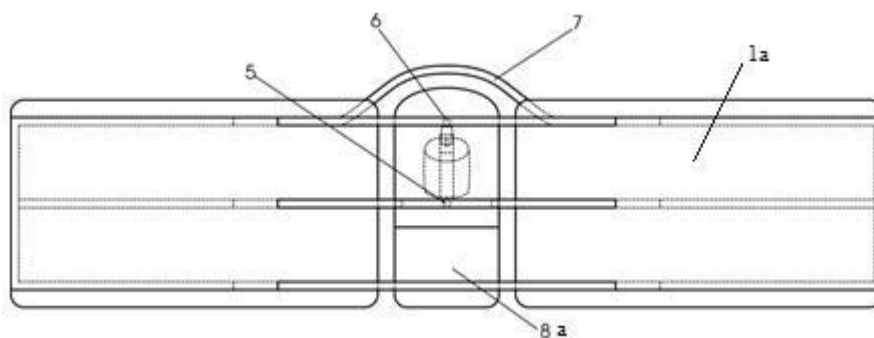


Figura 3.2 – Vista frontal do CECO

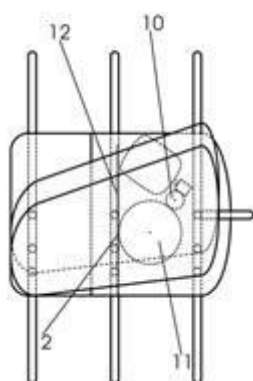
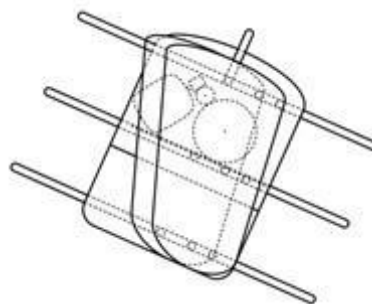


Figura 3.3 – Vista lateral do CECO



3.4– Vista lateral do CECO em posição de funcionamento

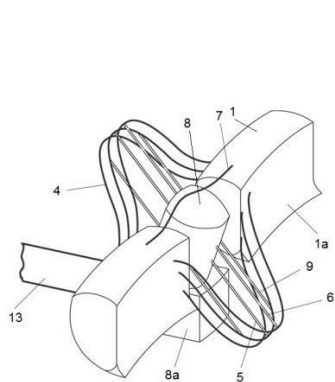


Figura 3.5 – Perspetiva para fixação horizontal do CECO

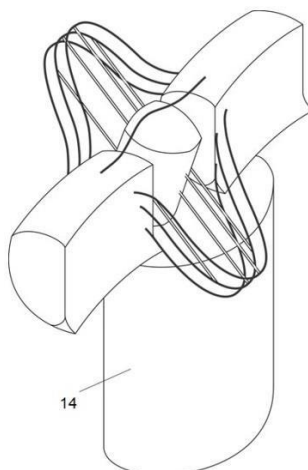


Figura 3.6 – Perspetiva para sustentação vertical do CECO

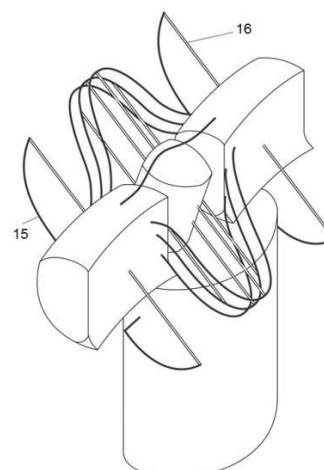
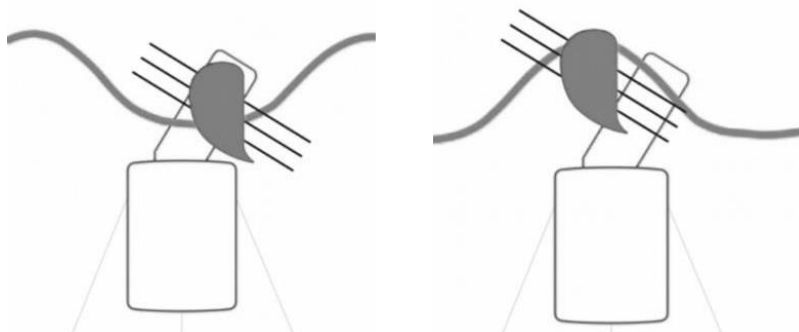


Figura 3.7 – Perspetiva para unidades CECO de grandes dimensões



3.8– Esquema representativo do funcionamento do CECO, quando é atingido pela cava (esquerda), e quando é atingido pela crista (direita), (adaptado de Marinheiro, 2013)

Quadro 3.2 – Listagem das componentes do CECO (adaptado de Teixeira, 2012)

Componente	Função	Legendas
Módulo lateral móvel	Barreira à propagação da onda	1
Superfície frontal de impacto	Zona de impacto da onda	1a
Mecanismo cremalheira-engrenagem	Conversão do movimento linear dos tirantes em rotativo	2
Gerador	Conversão do movimento rotativo em energia elétrica	3
Elemento anelar estrutural	Estrutural	4
Tirante central	Transmissor do movimento	5
Tirante superior	Orientador e estabilizador de movimento	6
Ligador superior	Solidarização dos dois módulos laterais	7
Corpo central fixo	Guiamento dos tirantes	8
Câmara com lastro (no corpo central fixo)	-	8a
Tirante lateral	Orientador e estabilizador de movimento	9
Conjunto mecânico elevador de velocidade de rotação	Aumentar a velocidade de rotação transmitida pela cremalheira	10
Engrenagem	Absorver o movimento linear oblíquo	11
Cremalheira	Transmitir o movimento linear oblíquo	12
Fixador horizontal	Suporte do CECO	13
Boia de sustentação vertical	-	14
Suporte lateral	Estrutural	15
Tirante suplementar oblíquo fixo lateral	Estrutural	16

3.2.2 MÓDULOS LATERAIS MÓVEIS

Os módulos laterais móveis (MLM's) são dois elementos metálicos flutuantes que podem assemelhar-se a uma boia. Estes módulos apresentam uma superfície frontal de impacto vertical, ligeiramente côncava, cujo objetivo fundamental é impedir a propagação natural da onda, de modo a poder absorver e converter a sua energia.

A ligação entre os dois módulos é feita através de três elementos anelares paralelos, que resistem a fenómenos de torção (horizontal sobre eixo vertical), sendo ainda colocado um elemento de solidarização (barra metálica) no topo, de forma a aumentar a resistência à torção (vertical segundo eixo horizontal).

De modo a poder retirar o máximo proveito do dispositivo é necessário ajustar o grau de submersão do mesmo, consoante as condições pontuais que se apresentam. Apesar de, na presente data, não estar definido ainda um modo de funcionamento ótimo e definitivo, está verificado que tal ajuste é possível através da colocação de lastro no interior dos módulos (Teixeira, 2012). Outra forma, eventualmente viável, consiste na implantação dum mecanismo que permita controlar a entrada de água nos elementos flutuantes, de modo a que estes tenham sempre o peso pretendido. Esse mecanismo possibilitaria ainda a submersão completa do CECO em períodos de tempestade (Marinheiro, 2013).

3.2.3 TIRANTES

Como foi referido anteriormente, a ligação entre os dois módulos laterais móveis é feita através de três elementos anelares de cada lado, paralelos. No entanto, importa especificar e explicar que a ligação entre estes é efetuada através de um tirante central e dois tirantes laterais, que atravessam o corpo do dispositivo para ligar a parte frontal e a retaguarda do elemento anelar estrutural mediano.

A função do tirante central é fazer movimentar, obliquamente, o mecanismo cremalheira-engrenagem, sendo a cremalheira parte da massa modular móvel e a engrenagem parte do corpo fixo (Marinheiro, 2013).

Por seu lado, os dois tirantes laterais, situando-se também em posição oblíqua, não têm qualquer papel na produção de energia, estando o seu objetivo relacionado com a orientação e estabilização do movimento.

3.2.4 CORPO CENTRAL FIXO

Sendo considerado um elemento estrutural decisivo, será no corpo central fixo que se irá situar o sistema gerador de energia, constituído pela cremalheira, conjunto mecânico que possibilita o aumento da velocidade de rotação e do gerador. No seu interior encontram-se as calhas de guiamento que permitem orientar e estabilizar o movimento dos tirantes, tornando viável o ajuste do sistema da variação da inclinação do dispositivo, de acordo com as condições de agitação locais, de forma a retirar o máximo proveito do CECO.

É ainda de considerar a instalação duma câmara de lastro neste mesmo corpo, totalmente estanque, onde seria possível colocar o gerador. A existência de diversas possibilidades sobre a constituição interior do corpo central fixo será, provavelmente, um dos fatores que levou à não especificação das dimensões do corpo central no registo de patente do dispositivo CECO.

3.3 CLASSIFICAÇÃO DO DISPOSITIVO CECO

Conforme foi explicado no capítulo introdutório, não será investido demasiado tempo, na presente dissertação, com determinados conceitos teóricos, como a classificação de WEC's, uma vez que já foram abordados em detalhe nos trabalhos anteriores (Teixeira, 2012; Marinheiro, 2013). Quanto à classificação do CECO propriamente dita, no que toca ao modo de funcionamento, é claro que pode ser considerado como um corpo oscilante com um grau de liberdade, mais precisamente, flutuante. Já no que diz respeito à distância à linha de costa, a sua classificação depende da opção que se tome na sua instalação, podendo ser *nearshore* ou *offshore*. Quanto ao último critério, dimensão ou orientação do dispositivo, o dispositivo poderá ser classificado como absorvedor pontual ou como absorvedores múltiplos, caso seja instalado sozinho ou inserido num parque com vários dispositivos, respetivamente.

3.4 PERSPETIVAS DE INSTALAÇÃO

O dispositivo CECO pode ser instalado junto à costa, fixo a uma estrutura de suporte (e.g. molhe, pilar, quebramar, etc...), ou ao largo, em águas mais profundas.

Em instalações junto à costa, o CECO pode ser fixado através de suportes horizontais, que ligam o corpo central a pontos de amarração rígidos, de acordo com a Figura 3.5, sendo fundamental que estes fixadores sejam capazes de ajustar automaticamente a sua orientação e a sua posição, mediante a direção de incidência da onda e o nível da maré, respetivamente.

No caso de instalações em locais de profundidade elevada, poderá ser instalada uma boia na zona inferior do corpo central fixo, amarrada ao fundo do oceano, com o objetivo de sustentar e equilibrar verticalmente o dispositivo. Poderá ainda ser contemplado um sistema de bombagem que permita o enchimento da boia com água, de modo a possibilitar a submersão completa do CECO, em caso de tempestade.

Em termos de perspetivas futuras de instalação, não será ainda de desprezar a eventual viabilidade de fixação do dispositivo em pilares de torres eólicas, *offshore*, ora cravadas diretamente nos fundos, em zonas com profundidade de água pequena/intermédia, ora inseridos em estruturas flutuantes, em locais onde a profundidade de água é elevada e torna insustentável a cravação das torres no fundo do mar.

Apesar de a forma de fixação não estar ainda completamente estudada e definida, é de prever a necessidade de associar o corpo do CECO a um sistema de translação vertical, que permita ajustar o dispositivo ao nível da maré, de forma a aproveitar constantemente as diferentes condições de agitação marítima. A ideia de complementar o conceito deste dispositivo com o aproveitamento da energia eólica, beneficiando da existência de instalações próprias, aparenta, à data de realização deste trabalho, ser prometedora.

3.5 FUNCIONAMENTO

O conceito que está na génese deste dispositivo baseia-se no aproveitamento da energia cinética e potencial das ondas, através da sua conversão em energia elétrica, assumindo, segundo o princípio da conservação da quantidade de movimento, que o movimento inicial é igual ao movimento final, sem prejuízo da massa intermédia permanecer imóvel. Para isso, é criada uma barreira ao avanço natural das ondas, através dos dois módulos laterais móveis. Assim, aquando do impacto, estes tenderão a

resistir, de forma a manterem-se imóveis, no entanto, por ação da onda, existirá de facto um movimento, o que provocará que a energia, em vez de ser dissipada, seja absorvida pelo dispositivo, sendo convertida em energia mecânica.

Como já foi referido, a colocação de lastro possibilitará o ajuste do nível de submersão, de modo a aproveitar da melhor forma possível a energia da agitação marítima incidente. A possibilidade de o dispositivo se ajustar consoante as características da agitação, por exemplo, também no que diz respeito à sua inclinação relativamente ao plano horizontal, é outro fator de elevado relevo para a avaliação da sua viabilidade.

Durante a propagação de uma onda, esta incide sobre a superfície frontal dos módulos laterais móveis, originando forças de inércia, resistência e impulsão, forçando os mlm's a deslocarem-se segundo uma direção oblíqua ascendente.

Tal como já foi explicado, os elementos anelares estão perfeitamente solidarizados a tirantes que atravessam o corpo central. O tirante central tem como função realizar a transferência do movimento oblíquo para o sistema cremalheira-engrenagem. Este sistema de cremalheira, possuindo dentes inclinados ao longo da sua superfície, entrará em contacto com a engrenagem, constituída por uma roda dentada helicoidal, o que levará à transformação do movimento linear oblíquo em movimento rotativo, que por sua vez fará entrar em ação um gerador, situado no corpo central, produzindo assim energia elétrica.

É ainda necessário instalar rodas desmultiplicadoras em contacto com a engrenagem, de forma a aumentar a velocidade de rotação, através da amplificação do movimento rotativo, precavendo assim casos em que a velocidade de rotação é insuficiente para ativar o gerador. Assim, procura-se também garantir que o gerador é ativado dentro da sua gama de condições ótimas de funcionamento, em que o rendimento é mais elevado. Essa amplificação é realizada por um conjunto mecânico, composto por rodas dentadas helicoidais de redução de diâmetro original e por um pinhão, que ativará o gerador com uma velocidade de rotação superior à da engrenagem, permitindo assim a produção de energia elétrica.

No modelo físico testado, o PTO gira em ambas as direções, seguindo os movimentos ascendentes e descendentes dos módulos laterais móveis. Evitar essa inversão de direção poderia melhorar a eficiência (Rosa Santos et al, 2014a). Para além disso, o PTO apresenta um regime ótimo de funcionamento, relacionado com uma determinada velocidade de rotação do eixo do motor, que se verificou ser função do nível de amortecimento simulado. No estudo em modelo físico, o motor foi acoplado a uma caixa redutora de velocidade, o que permitiu a sua aplicação para baixas velocidades de translação dos dois LMM, caso contrário, a velocidade de rotação do motor estaria demasiado longe do ponto de funcionamento ótimo. A inclusão de uma caixa de velocidades automática poderá garantir que o PTO trabalhará no seu regime ótimo durante a maior parte do tempo, aumentando assim a sua eficiência (Rosa Santos et al, 2014a).

3.6 RESUMO DO TRABALHO EFETUADO ANTERIORMENTE

A presente dissertação enquadra-se num contexto muito específico, cujo início teve lugar com Teixeira, em 2012, através duma primeira análise da viabilidade e do comportamento do dispositivo conversor da energia cinética das ondas, CECO. Nesse trabalho e, tendo por base as orientações descritas no registo da patente, foi construído um modelo físico à escala geométrica 1/20 e foram realizados vários testes no Laboratório de Hidráulica da FEUP. O Quadro 3.3 apresenta as condições de teste consideradas no estudo efetuado por Teixeira (2012).

Quadro 3.3 – Síntese dos testes realizados por Teixeira (2012)

Tipo de Agitação	Grau de Inclinação do CECO (°)	Altura de onda (m)	Período de onda (s)
Regular	30	1,0	8
		1,5	8; 10; 12
		2,0	10; 12
	45	1,0	8
		1,5	8; 10; 12
		2,0	10; 12
Irregular	30	1,0	8
		1,5	8; 10; 12
		2,0	10; 12
	45	1,0	8
		1,5	8; 10; 12
		2,0	10; 12

A Figura 3.9 apresenta o modelo erguido por Texeira (2012), sendo possível observar-se claramente as diferentes componentes do dispositivo.



Figura 3.9 – Modelo físico, à escala geométrica 1/20, construído por Teixeira (2012)

As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam a vista frontal e a vista lateral do modelo físico, construído por Teixeira (2012), com as respectivas dimensões.

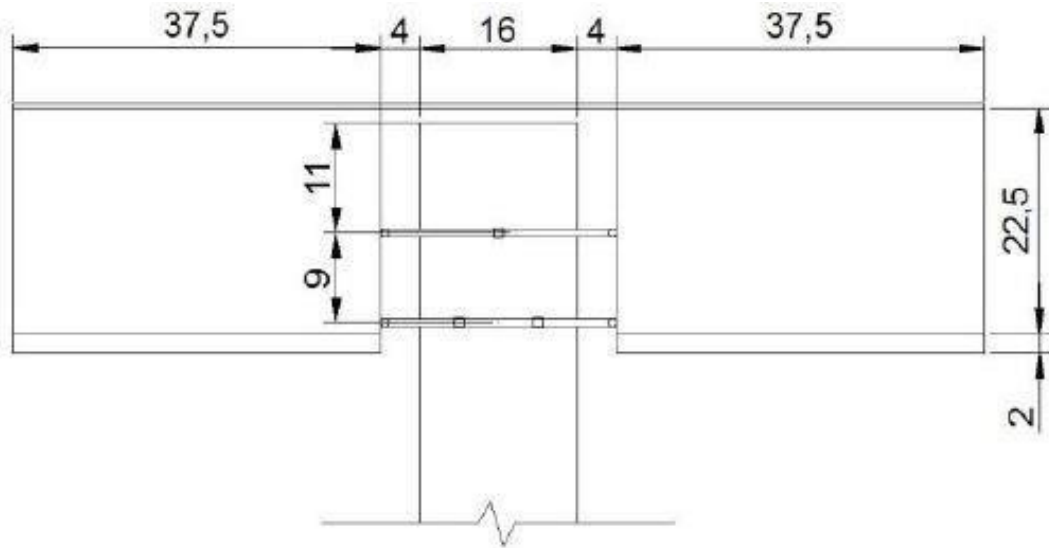


Figura 3.10 – Vista frontal do modelo físico, medidas em cm (adaptado de Teixeira, 2012)

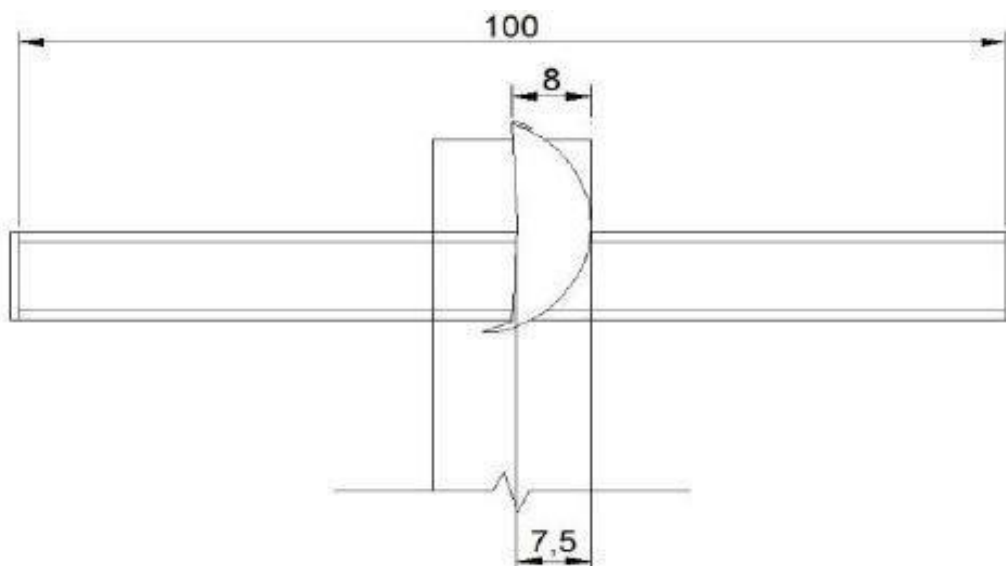


Figura 3.11 – Vista lateral do modelo físico, medidas em cm (adaptado de Teixeira, 2012)

Marinheiro (2013) deu continuidade a este trabalho, procurando aperfeiçoar o modelo físico anterior, nomeadamente a geometria dos seus módulos laterais móveis. De facto, tendo como objetivo reduzir os esforços de flexão presentes no elemento superior de ligação dos mlm's, ao mesmo tempo que se procurava aumentar a energia absorvida em profundidade por metro de frente de onda, nesse trabalho optou-se por alterar as dimensões dos mlm's, relativamente aos valores de referência presentes no

registro da patente. O Quadro 3.4 apresenta algumas diferenças consideradas nos trabalhos de Teixeira (2012) e de Marinheiro (2013), relativamente ao registro de patente, que visaram otimizar o desempenho do dispositivo.

Quadro 3.4 – Diferenças na geometria do modelo (valores de protótipo)

Componente	Registro da Patente (m)	Teixeira (2012) (m)	Marinheiro (2013) (m)
MLM's (altura)	4,5	4,5	8,0
MLM's (largura)	7,5	7,5	4,5
Tirantes (comprimento)	7,0	20,0	24,0

O trabalho de Marinheiro dividiu-se em duas fases. Na primeira o objetivo foi, essencialmente, avaliar se o modelo físico construído permitia realizar ensaios com as condições e os parâmetros desejados. Posteriormente, na segunda fase, após algumas modificações no modelo, foram realizados diversos testes, com o objetivo de comparar a resposta do dispositivo aos diferentes estados de agitação e parâmetros que foram considerados e variados (amortecimento, grau de submersão, inclinação e posição do centro de gravidade). Os Quadros 3.5 e 3.6 apresentam as condições de testes nas duas fases de estudo.

Quadro 3.5 – Condições de teste na primeira fase de estudo (adaptado de Marinheiro, 2013)

Grau de submersão	Agitação	Amortecimento	H (m)	T (s)
≈ 60%	Regular	S/ amortecimento	1,0	8
	Irregular		2,0	8; 10; 12
	Crista Curta		3,0	10; 12
≈ 80%	Regular	C/ amortecimento 22 Ohms	1,0	8
	Irregular		2,0	8; 10; 12
	Crista Curta		3,0	10; 12

Quadro 3.6 – Condições de teste na segunda fase de estudo (adaptado de Marinheiro, 2013)

Grau de submersão	Agitação	Amortecimento	Inclinação (°)	H (m)	T (s)
≈ 80%	Regular Irregular C.L.	100 Ω	45	1,0	8
				2,0	8; 10; 12
				3,0	10; 12
≈ 60%	Regular Irregular C.L.	10 Ω	30	1,0	8
				2,0	8; 10; 12
≈ 60%	Regular Irregular C.L.	22 Ω	45	1,0	8
		5,7 Ω		2,0	8; 10; 12
		1,0 Ω		3,0	12
≈ 60%	Regular Irregular C.L.	10 Ω	45	1,0	8
				2,0	8; 10; 12
				3,0	10; 12; 14
				4,0	12; 14
≈ 60%	Irregular C.C.	10 Ω	45	1,0	8
				2,0	8; 10; 12
				3,0	10

A Figura 3.12 apresenta o modelo físico implantado por Marinheiro (2013).



Figura 3.12 – Modelo físico, à escala geométrica 1/20, implantado no tanque de ondas (Marinheiro, 2013)

As Figuras 3.13 e 3.14 apresentam, respetivamente, as perspetivas frontal e lateral do modelo físico, com as dimensões mais importantes. É possível observar as alterações introduzidas por Marinheiro (2013), relativamente ao modelo construído por Teixeira (2012).

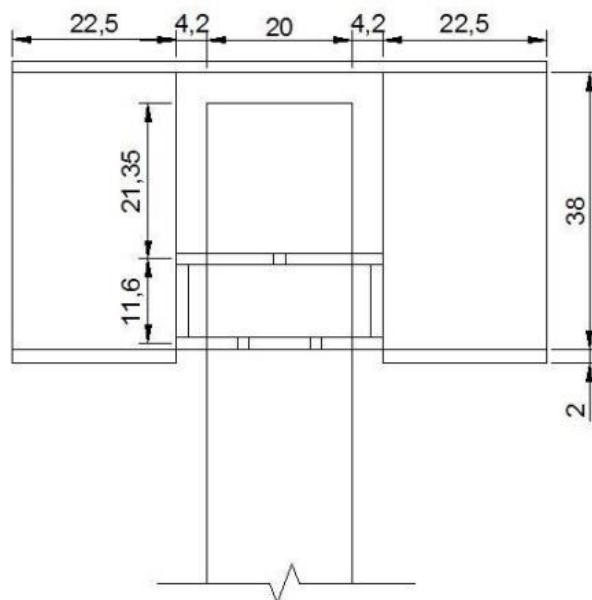
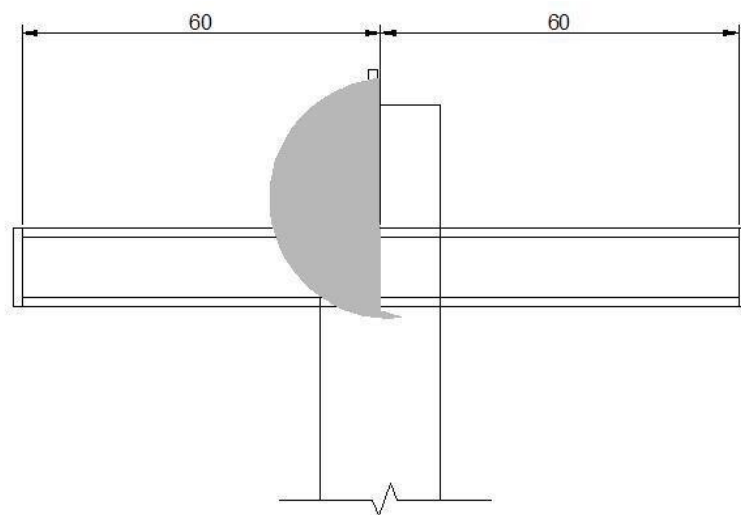
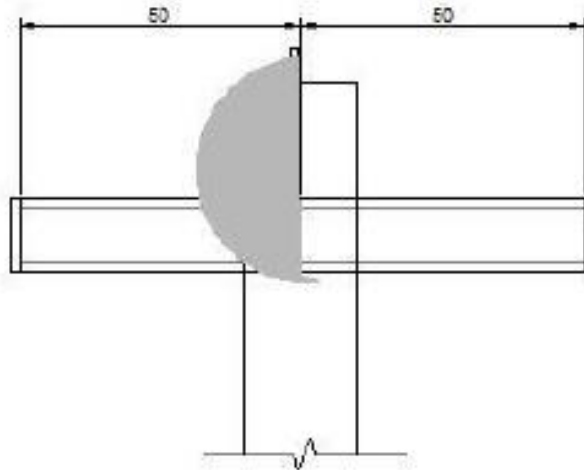


Figura 3.13 – Vista frontal, medidas em cm (adaptado de Marinheiro, 2013)



3.14 – Vista lateral, primeira fase de testes, medidas em cm (adaptado de Marinheiro, 2013)

Relativamente ao comprimento total dos tirantes e do elemento anelar estrutural, importa frisar que, devido a problemas experimentais no caso em que se colocou areia num dos compartimentos dos mlm's sem ser utilizado o estrado na base, Marinheiro (2013) viu-se obrigado a diminuir as suas dimensões em 20cm, conforme se pode observar na Figura 3.15.



3.15 – Vista lateral, segunda fase de testes, medidas em cm (adaptado de Marinheiro, 2013)

No que diz respeito à potência elétrica absorvida pelo dispositivo nos testes experimentais, esta foi estimada tendo por base dois métodos distintos: o método direto, alicerçado na medição da diferença de potencial nos polos do gerador e na sua conversão posterior para valores de potência instantânea absorvida, e o método indireto, fundamentado nas séries temporais dos movimentos do dispositivo registadas pelo sistema de aquisição de movimentos *Qualisys* (Marinheiro, 2013). Ambos os métodos têm as suas potencialidades e as suas limitações.

O método indireto permite qualificar o comportamento do CECO durante os testes experimentais, com base nos seus deslocamentos, rotações, velocidades e acelerações. Para além disso, é possível obter e utilizar resultados experimentais numa posterior calibração e validação de modelos numéricos (Marinheiro, 2013). No entanto, para determinar corretamente a potência absorvida pelo dispositivo, torna-se indispensável caracterizar devidamente o sistema de reprodução do PTO, o que apenas é alcançável através da realização de uma quantidade significativa de testes.

Relativamente ao método direto, a grande vantagem consiste na possibilidade de determinar diretamente as potências absorvidas pelo dispositivo através de uma série de expressões matemáticas, tendo por base a lei de Ohm. Aconselha-se novamente uma leitura atenta do trabalho de Marinheiro (2013) sobre este tema. Por outro lado, a principal limitação deste método prende-se com a incapacidade de conseguir adaptar o seu ponto ótimo de funcionamento à velocidade que o dispositivo alcança, algo que seria ultrapassado se se dotasse o motor utilizado como gerador de uma caixa de velocidades ou de um ponto ótimo de funcionamento mais abrangente (Marinheiro, 2013).

Entre os diversos prós e contras, os fatores que levaram a que Marinheiro optasse por utilizar o método direto foram:

- O insuficiente tempo para realizar a quantidade de testes exigível para uma correta caracterização do sistema de reprodução do PTO;
- O facto de uma incorreta utilização do método indireto poder levar a uma sobrestimação do desempenho do dispositivo CECO;
- O facto de, a incapacidade de adaptar o ponto ótimo de funcionamento à velocidade do dispositivo no método direto, conduzir a uma subestimação do desempenho do CECO;

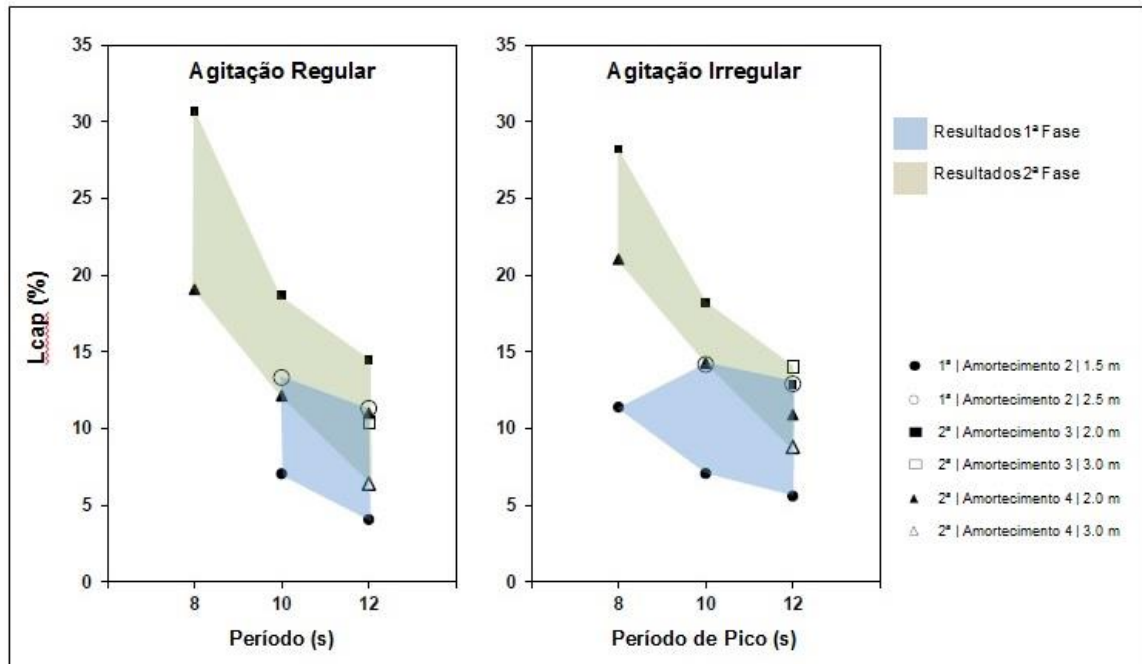
- O método direto não é influenciado pelas perdas que ocorrem na energia mecânica associada ao movimento do dispositivo em energia elétrica, uma vez que a sua análise é realizada a jusante destas perdas (Marinheiro, 2013);

Assim, os desenvolvimentos no modelo físico levaram a que este se apresente agora mais robusto e mais eficiente, tendo-se verificado um aumento da largura de captura. As conclusões deste segundo trabalho foram:

- A estabilidade da base é essencial para o perfeito funcionamento do dispositivo;
- Os desenvolvimentos no sistema de guiamento dos tirantes permitiram minimizar os deslocamentos e rotações nas outras direções, que não à direção do movimento principal, logo, da produção de energia;
- A instalação do CECO em águas profundas está condicionada pelo desenvolvimento dum método de amarração eficaz, que não prejudique o seu desempenho;
- Ao contrário do que foi concluído por Teixeira (2012), a amplitude do movimento de avanço é diretamente proporcional à altura de onda mas inversamente proporcional ao período, para os vários estados de agitação estudados;
- O amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO influencia decisivamente a amplitude do movimento de avanço do dispositivo;
- Aparentemente não é viável a utilização de parâmetros adimensionais (RAO's) para antecipar a resposta do CECO, uma vez o sistema, globalmente, não apresenta um comportamento linear;
- Atendendo a que o sistema de reprodução do PTO apresenta um ponto ótimo de funcionamento, a eficiência associada à conversão da energia da onda em energia elétrica não é máxima em todos os momentos, uma vez que, nos estudos experimentais, as condições de funcionamento do gerador afastam-se do seu ponto ótimo de funcionamento por diversas vezes;
- Os dois métodos utilizados para determinar a potência instantânea absorvida apresentaram resultados bastante distintos, tendo-se optado pelo método direto;
- Quando se está perante estados de agitação com períodos e alturas de onda elevados, o dispositivo torna-se mais eficiente se os η 's tiverem um grau de submersão de 80%;
- Para períodos de onda curtos, a inclinação mais adequada para o CECO é de 45°, enquanto para períodos mais longos, a inclinação de 30° torna-se mais apropriada;
- Utilizando o método direto, a condição mais vantajosa em termos de largura de captura ($L_{cap} = 30,68\%$) verificou-se para um estado de agitação regular, uma inclinação de 45° e um grau de amortecimento associado à resistência de 22 Ω .

Com efeito, os resultados dos testes realizados após as alterações introduzidas por Marinheiro (2013) demonstram que estas foram positivas e que esta segunda versão do modelo físico do CECO está mais próxima daquilo que poderá ser o desenho e conceção final do dispositivo.

A Figura (3.16) apresenta as diferenças entre os resultados obtidos por Teixeira (2012) e por Marinheiro (2013), em relação à largura de captura relativa alcançada, para agitação regular e agitação irregular.



3.16 – Resultados obtidos para a largura de captura relativa por Teixeira (2012) e por Marinheiro (2013), para diferentes níveis de amortecimento e estados de agitação (adaptado de Rosa-Santos et al, 2014a).

4

MODELAÇÃO NUMÉRICA

4.1 INTRODUÇÃO

Depois da construção de um modelo físico simplificado do dispositivo CECO e da realização dos primeiros testes experimentais no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP, por Teixeira (2012), houve um subsequente aperfeiçoamento desse trabalho por Marinheiro (2013), que, tendo construído um modelo físico do dispositivo melhorado e mais realista, obteve larguras de captura (eficiência) mais elevadas, para uma gama mais completa de condições de teste. O presente trabalho, conforme já foi referido anteriormente, focar-se-á essencialmente na modelação numérica do dispositivo CECO.

Neste capítulo, para além de uma introdução genérica sobre a modelação numérica aplicada ao estudo de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas, pretende-se, ainda, dar a conhecer o pacote numérico “*ANSYS Academic Research Offshore/Marine*”, também designado por AQWA, utilizado nesta dissertação de mestrado, bem como apresentar dois casos de estudo preliminares, com resultados conhecidos e previamente validados, que, de uma forma ou de outra, possuem várias semelhanças com o caso de estudo em análise - o dispositivo CECO.

No desenvolvimento de qualquer WEC, a modelação numérica assume um papel fundamental, em diversas fases. Se inicialmente permite simular rapidamente diferentes partes e conceitos, também posteriormente será decisiva na correção ou na otimização de um qualquer dispositivo (Cruz, 2008). A evolução tecnológica verificada no séc.XX permitiu grandes desenvolvimentos no campo da simulação computacional de escoamentos de fluidos, apresentando vantagens que tornam o seu uso indispensável (André, 2010):

- Permite reduzir os custos e o tempo de exploração de qualquer dispositivo;
- Possibilita o teste de sistemas de dimensões consideráveis, cuja modelação física se apresenta como extremamente complexa;
- Admite um grau de precisão muito elevado, associado à resolução de equações matemáticas complexas e avançadas;
- Não apresenta limitações físicas, uma vez que é possível de efetuar em qualquer local, mesmo em computadores pessoais, que apresentam cada vez maior capacidade de processamento.

Uma simulação numérica deve considerar algumas propriedades (André, 2010):

- Estabilidade - os erros decorrentes do processo de cálculo não podem ser exponenciados pelo método utilizado;

- Consistência - a discretização deve tender para o valor exato à medida que o espaço na malha tende para zero. A diferença entre o valor da equação discretizada e o valor real, dá pelo nome de erro de truncatura;
- Convergência - a solução deve convergir para a solução exata;
- Precisão - as soluções numéricas do escoamento são valores aproximados, pelo que interessa minimizar os erros de modelação, convergência, entre outros;
- Conservação - as leis de conservação introduzidas pela dinâmica de fluidos devem ser respeitadas pelo esquema numérico.

No que concerne ao desenvolvimento de uma determinada simulação numérica, são obrigatórias três fases: pré-processamento, solucionador e pós-processamento.

O pré-processamento constitui a primeira fase e inclui a definição das condições de fronteira, das propriedades do fluido e a constituição da malha, sendo que esta última é criada através da discretização do domínio computacional num determinado número de elementos infinitesimais. É necessário chegar a uma solução de compromisso neste campo, uma vez que, por um lado, quanto maior for o número destes elementos, melhor será a precisão dos resultados obtidos, mas, por outro lado, também será superior o tempo necessário para a computação e para o processamento desses resultados.

O solucionador consiste num algoritmo numérico (ou conjunto de algoritmos), cujo procedimento inclui a modelação das variáveis do escoamento num sistema de equações analíticas simples, a discretização das equações fundamentais, substituindo-as pelas equações analíticas atrás referidas e a resolução do sistema de equações algébricas.

O método das diferenças finitas implica o recurso a malhas demasiado estruturadas, o que inviabiliza a sua utilidade. Assim, a maioria dos códigos baseia-se na discretização de elementos finitos, garantindo uma flexibilidade adequada na construção da malha. Isto é conseguido através das seguintes operações:

- Integração das equações do escoamento dos fluidos por todos os volumes de controlo do domínio;
- Conversão das equações integrais num sistema de equações algébricas;
- Determinação da solução das equações algébricas através de métodos iterativos;

A principal vantagem, acima referida, sobre o método das diferenças finitas e dos elementos finitos, consiste no uso dum conceito chave durante este processo: o princípio de conservação das quantidades físicas, expressas pelas equações que regem o fenómeno sobre qualquer volume de controlo.

O pós-processamento engloba o estudo da solução pelo modelo numérico utilizado no cálculo, sendo então possível calibrar o respetivo modelo numérico e validá-lo através da comparação com resultados experimentais.

Importa, ainda, explicar as diferenças entre dois métodos distintos, utilizados para resolver o problema hidrodinâmico da interação entre estruturas e a agitação marítima: o método dos painéis e a teoria das faixas. Na teoria das faixas o corpo é considerado como a soma de um número finito de secções transversais bidimensionais (faixas), perpendiculares ao seu eixo longitudinal e ligadas rigidamente entre si (Rosa Santos, 2010). Cada uma das faixas é estudada individualmente, como se fizesse parte de um cilindro infinitamente longo, sendo as forças devidas à agitação marítima calculadas em cada uma dessas secções transversais e posteriormente integradas ao longo de todo o comprimento do

navio, de modo a obter a sua grandeza total (Rosa Santos, 2010). O método dos painéis será abordado separadamente em (4.2), uma vez que é o método no qual o AQWA se baseia.

4.2 Método dos Painéis

É fundamental, neste ponto, abordar o método em que o AQWA se baseia: BIEM, *Boundary Integral Equation Method*, em que a solução numérica dos problemas de condição fronteira se baseia na discretização da equação integral em painéis.

O método dos painéis baseia-se na teoria de escoamento potencial, sendo frequentemente utilizado para resolver geometrias complexas. Assumindo que o potencial de velocidades ao longo da camada limite é resolvido através da discretização dessa mesma camada, este método reduz a dimensão do problema de modo a que este possa ser resolvido numericamente (Li e Yu, 2012).

No caso de análises de problemas de difração e de radiação no domínio da frequência, a equação diferencial que rege o potencial de velocidades do escoamento em torno do corpo é transformada numa equação integral, sendo o potencial apresentado sob a forma de uma distribuição de singularidades (fontes, dipolos ou ambas) na superfície molhada dos corpos que estão contidos no domínio em estudo. Neste caso a discretização da equação integral é realizada dividindo a fronteira do domínio em painéis, no centro dos quais é imposta uma condição fronteira adequada.

A formulação do problema no domínio do tempo permite a inclusão de efeitos não lineares, sendo normalmente baseada em funções de resposta a impulso, referidas anteriormente em (2.2.4.3). No método dos painéis o domínio computacional é discretizado ao longo dos seus limites, incluindo a superfície livre e os limites dos corpos, o que implica que a matriz dos coeficientes para este sistema de equações deve ser calculada em todos os momentos individualizados de cálculo (Li e Yu, 2012).

Tanto o método dos painéis como a teoria das faixas são lineares, no entanto, enquanto no método dos painéis se considera que o escoamento em torno da superfície do corpo é tridimensional (3D), na teoria das faixas assume-se que o escoamento é bidimensional (2D) em cada secção transversal da superfície. Ou seja, se por um lado o método dos painéis resolve o problema de condição fronteira assumindo a equação de Laplace, e as condições de fronteira na superfície livre e no corpo, todas 3D, por outro, a teoria das faixas assume que as mesmas condições são 2D (Rosa Santos, 2010).

4.3 ANSYS AQWA

4.3.1 INTRODUÇÃO

O software AQWA, da ANSYS, consiste num conjunto de pacotes numéricos capazes de analisar os efeitos do vento, das ondas e das correntes marítimas em estruturas *offshore*, fixas ou flutuantes. É possível dividir o software em três pacotes elementares: AQWA Diffraction, AQWA Suite e AQWA Suite with Coupled Cable Dynamics. Recentemente a ANSYS criou a plataforma Workbench, que contém o AQWA Hydrodynamic Diffraction, um pacote numérico que inclui os três formatos básicos anteriormente referidos, acumulando e agrupando todas as suas potencialidades.

Para efetuar a análise da interação entre os diferentes parâmetros ambientais atrás referidos e uma ou mais estruturas marítimas, o software baseia-se na teoria de radiação/difração a três dimensões, sendo as fronteiras discretizadas por painéis. O AQWA utiliza ainda os pressupostos da equação de Morison como alternativa ou como complemento. Para além disso, é também possível, através do AQWA Hydrodynamic Time Response, analisar, no domínio do tempo, as solicitações atuantes num corpo, ou

conjunto de corpos, fixos ou flutuantes, considerando agitação regular ou agitação irregular, bem como a resposta, nos seis graus de liberdade, desses corpos, às solicitações a que são submetidos. A teoria que está na génese do AQWA, assim como a descrição das diferentes funções e capacidades do software, encontra-se detalhada em três manuais: o AQWA Theory Manual (ANSYS, 2012a), o AQWA User Manual (ANSYS, 2012b) e o AQWA Reference Manual (ANSYS, 2012c).

4.3.2 PLATAFORMA WORKBENCH

A plataforma Workbench permite integrar as diferentes funcionalidades dos softwares referidos, tornando possível criar diferentes ligações e escalonamentos entre pacotes diferentes, sendo que a componente “Geometry” é a única possível de associar e transferir entre análises distintas, conforme se pode observar na Figura (4.1). Por seu lado, dentro de uma análise hidrodinâmica, é possível transferir todas as condições de teste, para além da geometria, alterando apenas o domínio da análise.

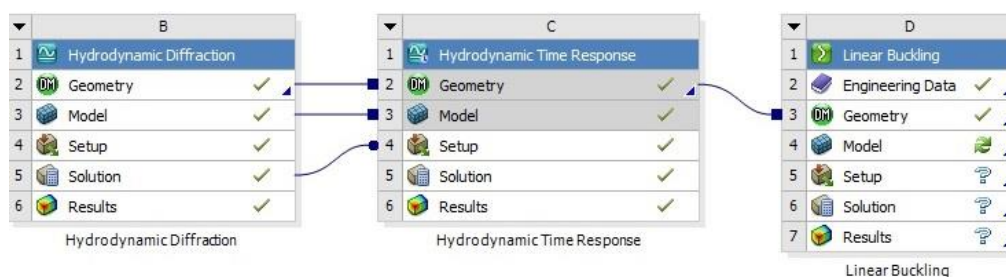


Figura 4.1 – Exemplo de utilização do Workbench.

O procedimento comum de uma simulação passa pelos seguintes passos:

- Definição da geometria;
- Definição das condições de testes;
- Definição da malha;
- Definição do tipo de outputs pretendidos;
- Solução.

O primeiro passo é realizado no *Design Modeler*, uma das componentes do *Workbench*, onde se cria a geometria pretendida para um ou mais corpos. Posteriormente, os seguintes passos serão dados no modelo (*Model*) utilizado, neste caso o AQWA.

Conforme foi mencionado anteriormente, a simulação de dois casos simples, complementares, seria fundamental para uma melhor compreensão da forma como o AQWA permite a simulação e interpreta as diferenças entre elementos fixos ou flutuantes, ou ainda entre elementos esbeltos ou de volume considerável. A comparação dos resultados obtidos com o AQWA para esses casos com resultados disponíveis na literatura permitiria assim validar as abordagens seguidas durante o cálculo.

Este trabalho preliminar permite fazer, depois, por analogia, uma transição mais fácil para o dispositivo CECO, uma vez que este tem componentes que se encaixam nos perfis acima descritos. Os flutuadores, por exemplo, tal como o próprio nome indica, integram-se na categoria das estruturas flutuantes, enquanto os tirantes, por seu lado, poderão ser interpretados como elementos enquadáveis nas condições de aplicabilidade da fórmula de Morison, por apresentarem um valor muito pequeno

para o quociente entre as suas dimensões transversais e o comprimento das ondas incidentes. Estes dois estudos apresentam-se nos subcapítulos seguintes.

4.3.3 ANÁLISE DE ESTRUTURAS ESBELTAS

4.3.3.1 Introdução

Já foi referido que o AQWA utiliza um método híbrido para poder aplicar em paralelo a teoria da difração e a fórmula de Morison. Esta utilização simultânea das duas teorias é possível, uma vez que o software identifica os componentes de volume considerável, aplicando a teoria da difração, da mesma forma que é capaz de reconhecer elementos mais esbeltos (nomeadamente, com um quociente entre o diâmetro e o comprimento da onda incidente menor que 1/5), que requerem a aplicação da fórmula de Morison.

De forma a poder analisar, no AQWA, a interação da agitação marítima com estruturas alongadas, através da fórmula de Morison, é necessário que se defina um de três elementos, onde o software aplica a fórmula de Morison:

- TUBE – Tubo cilíndrico;
- STUB – Tubo esbelto, com uma secção transversal arbitrária;
- DISC – Disco.

Os dois primeiros são definidos como elementos lineares, diferenciados apenas pela forma da secção transversal. O terceiro é, como o próprio nome indica, um disco, colocado por vezes nas extremidades dos elementos tubulares, formando uma área que gera uma força de arrastamento e uma massa adicionada, na direção normal à sua face. No entanto, não é possível, no AQWA, criar estes elementos dissociados de estruturas sólidas, sendo que estas deverão servir de suporte aos elementos lineares. Este facto merecerá o devido destaque mais à frente.

Importa, ainda, referir que as forças de resistência associadas à fórmula de Morison, com um comportamento não linear, não são calculadas diretamente no AQWA, sendo, no entanto, possível lineariza-las. Como se pode observar na equação de Morison (2.24), a força de resistência é função do termo não-linear $u|u|$, que pode ser traduzido como $(u_F - u_S)|u_F - u_S|$, em que u_F representa a velocidade transversal da partícula do fluido e u_S a velocidade transversal da estrutura. Este termo pode ser linearizado, substituindo-se $|u_F - u_S|$ por um fator multiplicado pela raiz quadrada da velocidade relativa. Borgman (1967) utiliza o factor α , escrito da seguinte forma,

$$\alpha = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \quad (4.1)$$

Assim, a força de resistência linearizada (F_{DL}) pode ser caracterizada como,

$$F_{DL} = C_D \cdot \rho \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \alpha \cdot u_{rq} \cdot (u_F - u_S) \quad (4.2)$$

em que u_{rq} representa a raiz quadrada da velocidade relativa na direção transversal.

De forma a melhor compreender o modo como o AQWA interpreta os diferentes elementos numa estrutura fixa, aplicando uma das teorias em que se baseia, foi simulado um caso de estudo: um pilar simples, fixo ao fundo do oceano, conforme se pode ver na Figura (4.2).

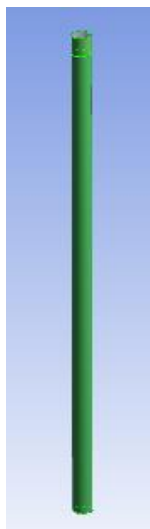


Figura 4.2 – Esquema teórico do pilar considerado

Características do pilar:

- Diâmetro (D): 0.50 m;
- Altura: 26.0 m;
- Altura submersa (d): 25.0m ;
- Altura emersa: 1.0 m.

Foram definidas as seguintes condições de teste:

- Período (T): 10 s;
- Altura de onda (H): 2 m;
- Profundidade: 25 m;
- Aceleração gravítica (g): 9.8067 m/s²;
- Comprimento de onda: 130.354 m;
- Massa volúmica da água: 1025 kg/m³;
- Coeficiente de inércia (C_M) : 1;
- Coeficiente de resistência (C_D): 3.

O comprimento de onda (L) foi determinado através dum método iterativo, assente na relação de dispersão que foi apresentada na expressão (2.6).

Conforme se pode verificar, a relação D/L é inferior a $1/5$, requisito necessário para cumprir as condições de aplicação da fórmula de Morison.

A reprodução deste tipo de estruturas fixas no modelo AQWA pode ser realizada através de uma ligação a um ponto fixo, independentemente de se fazer coincidir a sua base com a profundidade dos fundos pré-definida. Caso se pretenda que a base esteja fixa no fundo, como é o caso de estudo do

pilar, torna-se necessário, na definição da geometria, separar a base do resto da estrutura, criando duas partes num mesmo corpo. Assim, apesar de se tratar de uma separação fictícia, uma vez que a face continuará a fazer parte da estrutura, é possível posteriormente, no modelo, definir a base como um elemento que não difrata (*non-diffracting*), o que viabiliza a sua presença próxima do fundo do oceano.

Já foi referido que o AQWA apenas aplica os pressupostos de Morison em três tipos de elementos, TUBE, STUB e DISC, contudo, não é possível criá-los isoladamente, dissociados de estruturas sólidas, cuja análise é realizada pelo método dos painéis. Assim, abre-se, à partida, a possibilidade de realizar dois tipos diferentes de simulações: a primeira, considerando o pilar como uma estrutura sólida, exatamente com as mesmas características definidas anteriormente; a segunda, considerando o pilar como um elemento linear, de novo com as mesmas características já apresentadas, mas associado a uma estrutura de suporte na base, indispensável para a criação do elemento linear.

A primeira simulação não enquadra o pilar nas condições de aplicabilidade da fórmula de Morison, não considerando os efeitos do arrastamento nem da massa adicionada, assumindo automaticamente C_D e C_A igual a zero. Assim e, tendo em conta a génese da fórmula de Morison, nomeadamente as equações (2.21) a (2.24), a não consideração dos coeficientes anteriores reduz a força total ao efeito da força de *Froude-Krylov*, induzida pelo campo de pressões gerado pelas ondas não perturbadas pelo cilindro, considerando-se que a presença da estrutura não afeta a ação das ondas.

Por outro lado, a representação do pilar enquanto um elemento linear (TUBE), permite considerar os efeitos do arrastamento e da massa adicionada. No entanto, a criação indispensável da estrutura de suporte, por muito pequena que seja, irá introduzir alguma perturbação ao escoamento em torno da mesma, podendo causar eventuais discrepâncias nos resultados finais. Desta forma, definiu-se esta estrutura complementar como um cilindro com 0.1 m de diâmetro e 0.1 m de altura, a uma profundidade de 25.1m, encontrando-se o elemento linear fixo a esta estrutura, no centro da sua face superior, a 25 m de profundidade. De facto, uma análise crítica permite concluir que, em condições reais, dificilmente esta estrutura representaria um suporte eficaz para o cilindro considerado, no entanto, uma vez que a sua função no modelo AQWA pode ser considerada como virtual, procurou-se definir esta estrutura com uma dimensão bastante reduzida, de modo a minimizar a sua perturbação no escoamento. A Figura (4.3) apresenta o pormenor da estrutura de suporte, com o cilindro a desenvolver-se verticalmente a partir da mesma.

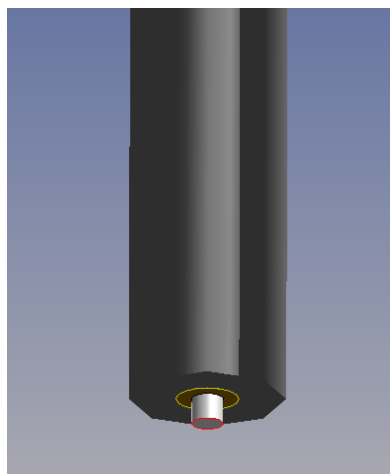


Figura 4.3 – Pormenor da estrutura de suporte do pilar.

4.3.3.2 Resultados

De forma a validar a aplicação do AQWA em estruturas alongadas, foram efetuados cálculos de três formas distintas: (i) no AQWA, utilizando exclusivamente a teoria da difração; (ii) de novo no AQWA, mas utilizando a fórmula de Morison; (iii) através de “cálculos manuais”, realizados com o auxílio do Microsoft Excel.

Neste último caso foram feitos cálculos de duas formas distintas: de forma direta, utilizando as equações que resultam da integração das forças e momentos ao longo de toda a extensão do pilar; e de forma indireta, considerando o pilar dividido em vários sub-trechos e aplicando a fórmula de Morison a cada um deles, calculando no final a força e o momento resultantes ao nível da base.

Relativamente ao cálculo indireto, o pilar foi dividido em fatias de 1.0 m de altura, tendo a força por unidade de comprimento sido calculada através da expressão (2.18), tendo por base valores de velocidade e de aceleração determinados através das fórmulas (2.7 e 2.8) e (2.11 e 2.12), respetivamente.

Por seu lado, a integração das referidas forças e momentos ao longo do pilar resultou nas seguintes expressões:

$$F = \rho g V \left(\frac{H}{2d} \right) \tanh(kd) [C_M \sin(\theta) + C_D \left(\frac{H}{4\pi D} \right) \frac{2kd + \sin(2kd)}{\sinh^2(kd)} |\cos \theta| \cos \theta] \quad (4.3)$$

$$M = \rho g V \left(\frac{H}{2d} \right) \left(\frac{1}{k} \right) \tanh(kd) \left[C_M \frac{kd \sinh(kd) - \cosh(kd) + 1}{\sinh(kd)} \sin \theta + C_D \left(\frac{H}{4\pi D} \right) \frac{(kd)^2 + kd \sinh(2kd) - \sinh^2(kd)}{\sinh^2(kd)} |\cos \theta| \cos \theta \right] \quad (4.4)$$

Os resultados demonstram uma concordância praticamente total entre a aplicação direta e indireta da fórmula de Morison, nomeadamente se for retirada da análise a parte do pilar emersa (Quadro 4.1), uma vez que as expressões (4.3) e (4.4) apenas resultam de uma integração das forças até à superfície livre.

Quadro 4.1 – Comparação dos resultados das Forças e Momentos obtidos através dos cálculos em Excel.

	Fase				
	0 π	$\pi/2$	π	3 $\pi/2$	2 π
F_T (kN/m) – Integração	5.413	1.648	-5.413	-1.648	5.413
F_T (kN/m) – Fórmulas	5.415	1.648	-5.415	-1.648	5.415
Diferença (kN/m)	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002
M_T (kN.m/m) – Integração	82.145	22.783	-82.145	-22.783	82.145
M_T (kN.m/m) – Fórmulas	82.145	22.783	-82.145	-22.783	82.145
Diferença (kN.m/m)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Procurando, em primeiro lugar, comparar com os resultados obtidos no AQWA, para a consideração do pilar enquanto uma estrutura sólida, não utilizando a fórmula de Morison, definiram-se as mesmas condições de teste, com um período (T) de 10 s e uma altura de onda (H) de 2 m. Atendendo a que, nestas condições, o software despreza o efeito do arrastamento e da massa adicionada, terá de se analisar este caso para uma fase em que estes efeitos não afetem os resultados obtidos através da utilização da fórmula de Morison. Tendo em conta esta formulação, as comparações serão válidas apenas uma fase de $\pi/2 \text{ rad} + k\pi$ ($k = 1, 2, 3 \dots n$), onde a força total é igual à força de inércia, uma vez que, nestes valores de fase, a força de arrastamento é multiplicada por zero. Por sua vez e, nas condições definidas, a força de inércia pode ser representada exclusivamente pela força de Froude-Krylov, uma vez que, considerando C_M igual a um, C_A será necessariamente igual a zero.

A Figura (4.4) apresenta a comparação entre os resultados obtidos para a força de inércia (F_I) obtida pela fórmula de Morison nos cálculos “manuais” e para a força de Froude-Krylov, obtida no AQWA, para diversos valores de fase.

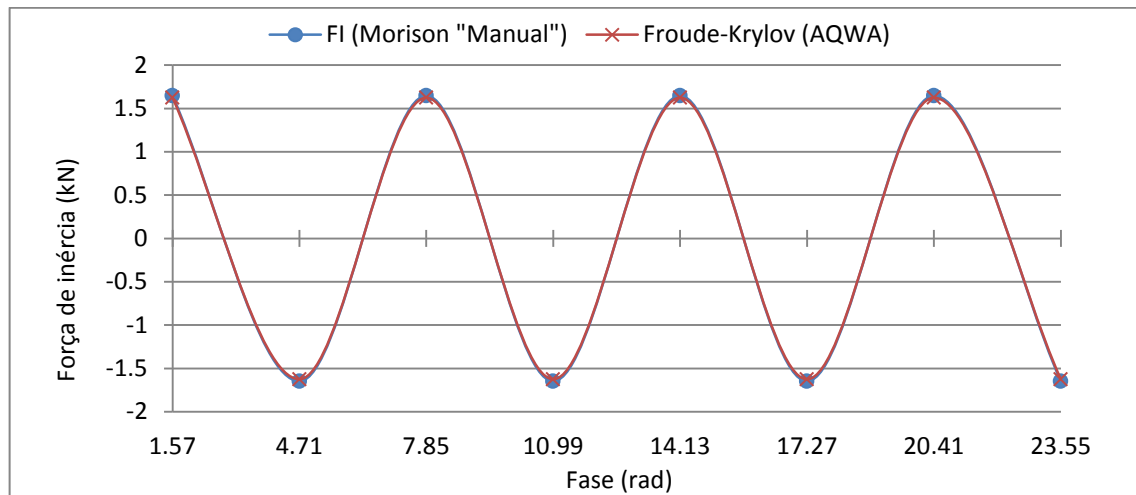


Figura 4.4 – Força de inércia. Comparação entre resultados dos cálculos “manuais”, utilizando a fórmula de Morison, e resultados para a força de Froude-Krylov, obtidos no AQWA.

Pela análise da Figura (4.4) verifica-se uma concordância praticamente perfeita entre os resultados obtidos através dos dois métodos. Com efeito, obteve-se um valor máximo absoluto para a força de Froude-Krylov, no AQWA, de 1.625 kN, enquanto os cálculos no Microsoft Excel permitiram chegar a um resultado para a força de inércia máxima na base do pilar, utilizando a fórmula de Morison, para as referidas fases, de 1.648 kN.

Por seu lado, também os valores obtidos para o momento na base apresentam uma concordância bastante satisfatória. Tendo em conta que, por defeito, o AQWA considera que o ponto de aplicação da força calculada para um qualquer corpo coincide com o centro de gravidade deste, a multiplicação pelo seu braço permite extrair o valor do momento aplicado na base do pilar.

A Figura (4.5) apresenta a comparação entre os dois métodos, tendo-se obtido um valor para o momento na base do pilar, através da fórmula de Morison (M_I), de 22.783 kN.m/m, para as fases consideradas, enquanto a extrapolação do valor determinado no AQWA para a força de Froude-Krylov, permite chegar a um valor do momento total de 21.124 kN.m/m. Esta comparação valida a utilização do modelo AQWA para as condições consideradas.

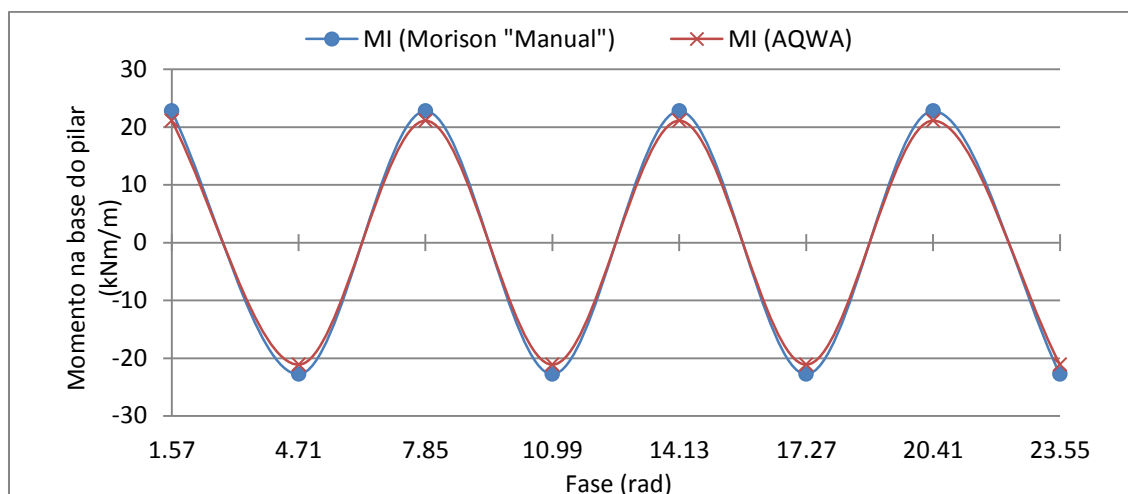


Figura 4.5 – Momento na base do pilar. Comparação entre resultados dos cálculos “manuais”, utilizando a fórmula de Morison, e os valores extrapolados dos resultados obtidos no AQWA.

Para além deste caso e, conforme se referiu anteriormente, efetuou-se uma segunda simulação, considerando agora o pilar como um elemento TUBE, o que permitiu considerar os efeitos do arrastamento e da massa adicionada. De forma a uniformizar os valores comparados com o cálculo “manual”, considerou um coeficiente de massa adicionada (C_A) igual a zero, mantendo o coeficiente de inércia (C_M) igual a 1, e um coeficiente de resistência (C_D) igual a três. Tal como seria de esperar, a presença da estrutura de suporte inferior não afetou os resultados obtidos para a força de inércia, comparada no modelo com o valor da força de Froude-Krylov, pelas razões referidas anteriormente, apresentando os mesmos valores obtidos para a simulação anterior.

No que diz respeito aos valores obtidos para a força de resistência (F_D), no AQWA, pode-se verificar, pela análise da Figura (4.6), que os mesmos se aproximam dos resultados determinados “manualmente”, pela utilização da fórmula de Morison. De novo, tendo como objetivo isolar a força de resistência, neste ponto apenas se consideraram valores de fase $0\pi \text{ rad} + k\pi$ ($k = 1, 2, 3 \dots n$), onde a força de inércia não afeta a força total.

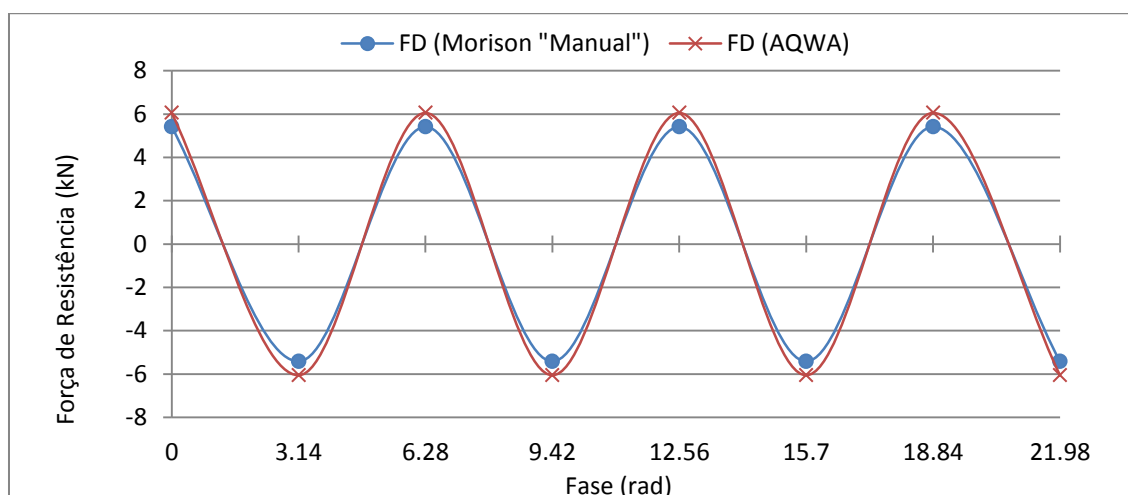


Figura 4.6 – Força de resistência. Comparação entre resultados dos cálculos “manuais”, utilizando a fórmula de Morison, e resultados para a força de resistência linearizada, obtidos no AQWA.

A observação da Figura (4.6) permite constatar que a concordância entre os dois métodos, apesar de não ser total, continua a ser bastante boa. As diferenças verificadas podem ter origem no processo de linearização da força de resistência, sendo ainda possível que sejam ligeiramente afetadas pela presença da estrutura de suporte. Por seu lado, a Figura (4.7) apresenta a comparação entre os valores obtidos para o momento na base do pilar, considerando apenas o efeito do arrastamento, para as fases referidas.

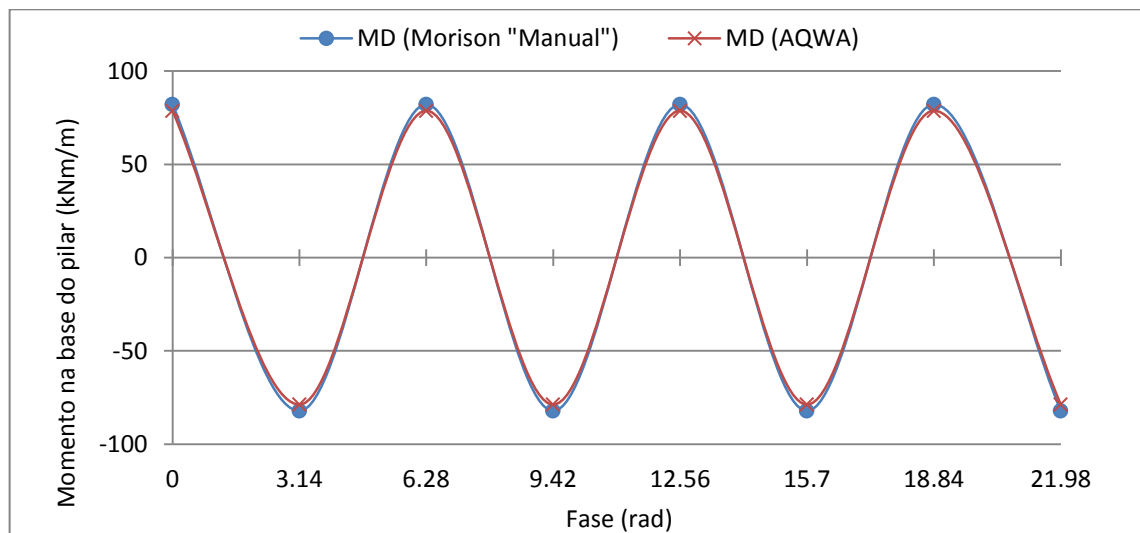


Figura 4.7 – Momento na base do pilar. Comparação entre resultados dos cálculos “manuais”, utilizando a fórmula de Morison, e os valores extrapolados dos resultados obtidos no AQWA.

A concordância entre os resultados obtidos encontra-se dentro do intervalo expectável. Desta forma, torna-se possível, nas Figuras (4.8) e (4.9), apresentar a comparação para a força e o momento totais na base do pilar, entre o cálculo “manual” e a simulação efetuada no AQWA.

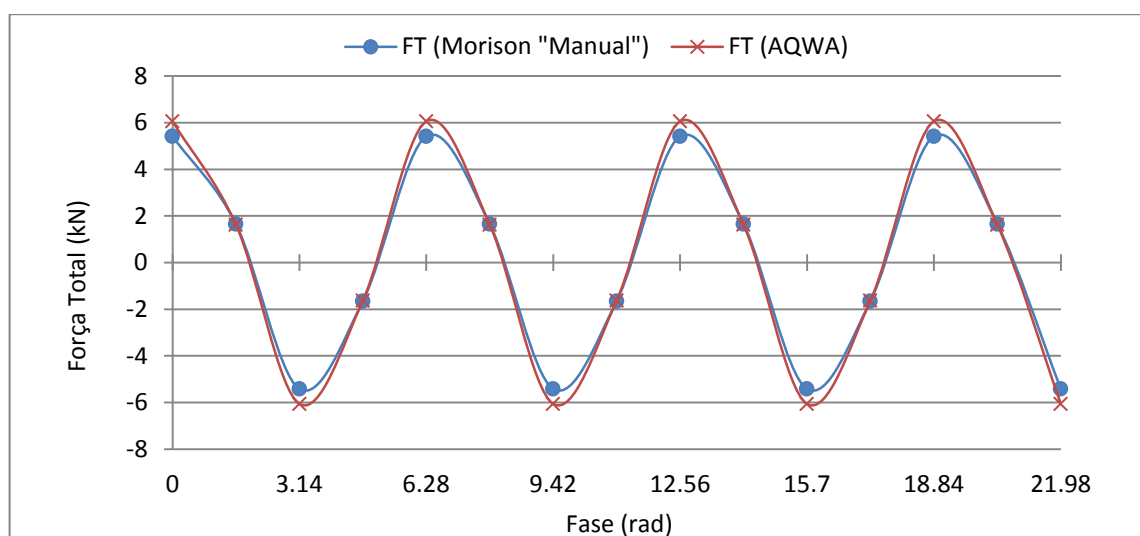


Figura 4.8 – Força total na base do pilar. Comparação entre os resultados obtidos através do cálculo “manual” e no modelo AQWA.

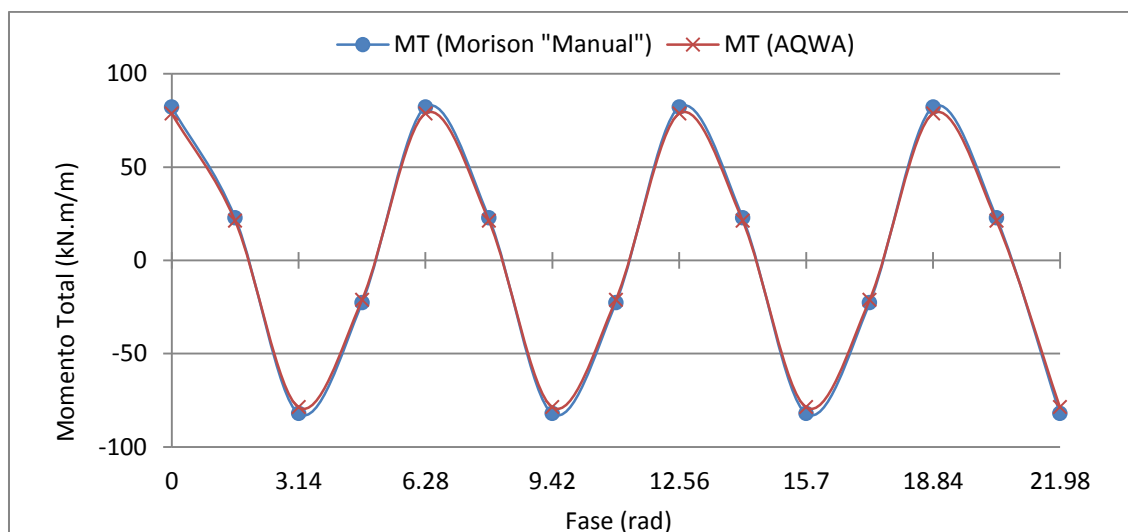


Figura 4.9 – Momento na base do pilar.
Comparação entre os resultados obtidos através do cálculo "manual" e no modelo AQWA.

Considerando que a força total é igual ao somatório da força de inércia e da força de resistência, a concordância entre os dois métodos revela-se de acordo com o esperado, bastante satisfatória. Estes resultados permitem validar a utilização do modelo AQWA para estruturas esbeltas, permitindo abordar a simulação de alguns componentes do CECO, como os tirantes ou o elemento anelar estrutural, cujas características se enquadram neste estudo apresentado, com maior segurança.

4.3.4 ANÁLISE DE ESTRUTURAS FLUTUANTES

4.3.4.1 Introdução

Complementarmente à análise de estruturas fixas, importa compreender e validar o modelo, no que diz respeito à interpretação e à análise de estruturas flutuantes. Para isso, aproveitou-se um caso de estudo com resultados conhecidos e previamente validados: uma barcaça, cujos resultados em modelo físico foram apresentados por Santos (1993), tendo por base o trabalho desenvolvido por Pinkster e Oortmersen (1977). Neste caso específico, pretende-se comparar os valores dos coeficientes de massa adicionada, dos coeficientes de amortecimento, das forças de excitação e dos movimentos oscilatórios do corpo flutuante.

A barcaça (Figura 4.10) considerada apresenta as seguintes características:

- Comprimento: 150 m;
- Boca: 50 m;
- Calado: 10 m;
- Altura emersa: 5 m (não definida nos trabalhos anteriores);
- Posição do centro de gravidade (x, y, z): (0, 0, -5);
- Massa: 75593750 kg;
- Raios de Giração:
 - Kxx: 20 m;
 - Kyy: 39 m;
 - Kzz: 39 m.

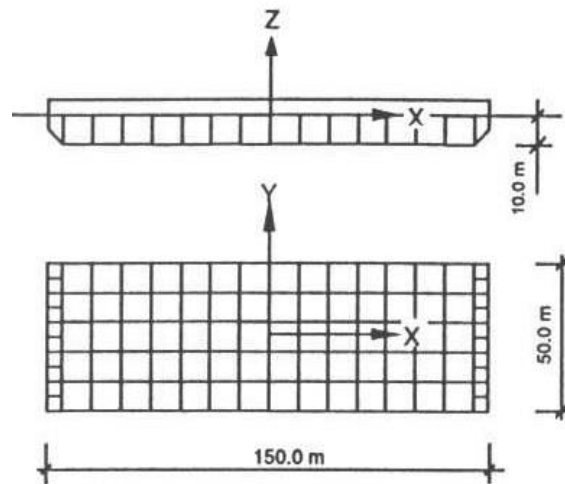


Figura 4.10 – Esquema da barçaça painelizada, adaptado de Santos (1993)

As condições de teste reproduzidas incluíram:

- Profundidade de água: 50 m;
- Aceleração gravítica: 9.8067 m/s^2 ;
- Massa volúmica da água: 1025 kg/m^3 .

Inicialmente foi utilizada a malha considerada por defeito no AQWA, uma malha 2/5 (Figura 4.11), ou seja, com as seguintes características:

- Tolerância na discretização (*defeaturing tolerance*): 2 m;
- Dimensão máxima dos elementos: 5 m;
- Número de elementos: 2416.

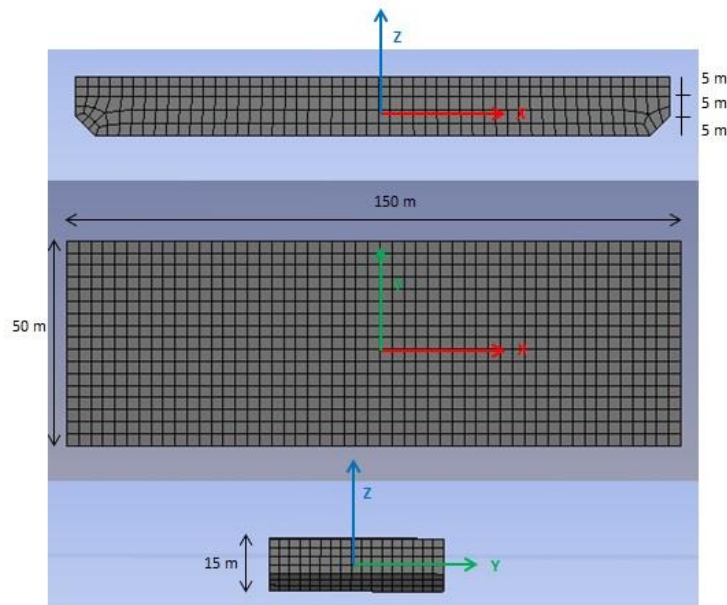


Figura 4.11 – Malha (2/5) e dimensões da barçaça

4.3.4.2 Massa adicionada e coeficiente de amortecimento

Conforme se pode verificar, a barçaça apresenta simetria em relação aos planos verticais que contêm os eixos dos xx e dos yy . Assim, assumindo que a zona de colocação da barçaça não é limitada horizontalmente, pode-se afirmar que, relativamente aos coeficientes de massa adicionada (a_{kj}) e de amortecimento relativos (b_{kj}) a efeitos cruzados, ou seja, $a_{kj}(\omega)$ e $b_{kj}(\omega)$ com $k \neq j$, apenas os termos 15 e 24 são não nulos (Santos, 1993). Importa, ainda, explicar, a título de exemplo, que o termo a_{15} representa a massa adicionada do corpo segundo o modo de oscilação de avanço em fase com a aceleração angular da oscilação de cabeceio e que o termo b_{24} representa o coeficiente de amortecimento segundo o modo de oscilação de deriva em fase com a velocidade angular da oscilação de balanço.

As massas adicionadas e os coeficientes de amortecimento utilizados como termo de comparação na verificação/validação do modelo numérico AQWA, não foram obtidos experimentalmente. No entanto, atendendo à concordância para as forças de excitação e para os movimentos, entre os resultados obtidos por Pinkster e Oortmersen (1977), através da modelação física e no WAMIT, por Santos (1993), este último conclui que os resultados para as massas adicionadas e para os coeficientes de amortecimento, obtidos no WAMIT, devem estar suficientemente próximos dos obtidos por Pinkster e Oortmersen (1977).

O Quadro (4.2) apresenta as fórmulas utilizadas para adimensionalizar os resultados provenientes do AQWA. Ambos os coeficientes, tal como as forças de excitação e os movimentos da barçaça, foram representados em função da frequência, convertida no eixo dos xx em $\omega\sqrt{L/g}$, em que ω é igual a $2\pi/f$, L representa o comprimento da barçaça (150 m) e g representa a aceleração gravítica (9.807 m/s²). No denominador das diferentes frações, o fator $\rho\nabla$ representa a massa da barçaça, aqui definida em função da massa volúmica da água (ρ) e do volume de água deslocado pela mesma (∇).

Quadro 4.2 – Adimensionalização dos coeficientes de massa adicionada e de amortecimento

Modo	Massa Adicionada	Amortecimento
$k = j = 1$ $k = j = 2$ $k = j = 3$	$a'_{kj} = \frac{a_{kj}}{\rho\nabla}$	$b'_{kj} = \frac{b_{kj}}{\rho\nabla\sqrt{\frac{g}{L}}}$
$k = j = 4$ $k = j = 5$ $k = j = 6$	$a'_{kj} = \frac{a_{kj}}{\rho\nabla L^2}$	$b'_{kj} = \frac{b_{kj}}{\rho\nabla L^2\sqrt{\frac{g}{L}}}$
$k = 1, j = 5$ $k = 5, j = 1$ $k = 2, j = 4$ $k = 4, j = 2$	$a'_{kj} = \frac{a_{kj}}{\rho\nabla L}$	$b'_{kj} = \frac{b_{kj}}{\rho\nabla L\sqrt{\frac{g}{L}}}$

As Figuras (4.4) a (4.11) apresentam os valores para a massa adicionada e para os coeficientes de amortecimento, nos diferentes modos de oscilação considerados.

Os resultados obtidos revelam uma concordância satisfatória com os resultados já conhecidos, como se pode aferir com uma análise das Figuras (4.12) a (4.19), menos para os coeficientes a'_{44} , b'_{44} , b'_{55} , a'_{24} e b'_{24} . Destes, as maiores discrepâncias estão associadas ao modo de balanço.

De facto, em termos globais, tanto o coeficiente de massa adicionada como o de amortecimento têm o comportamento expectável: com um aumento da frequência, os coeficientes de massa adicionada tendem para um valor constante, enquanto os coeficientes de amortecimento tendem para zero, sendo que para os diferentes componentes existe uma frequência para a qual estes coeficientes atingem um máximo.

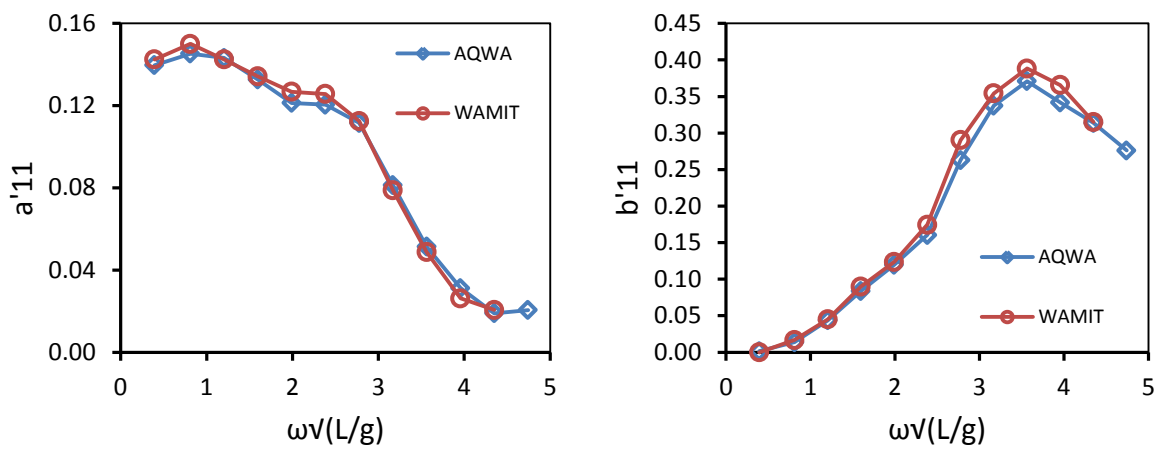


Figura 4.12 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de avanço. Barça Livre. Profundidade 50m.

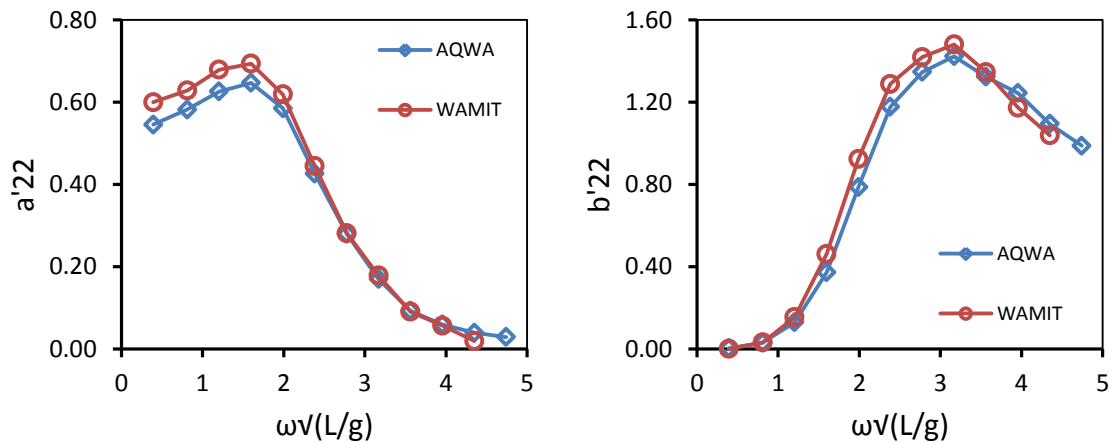


Figura 4.13 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de deriva. Barça Livre. Profundidade 50m.

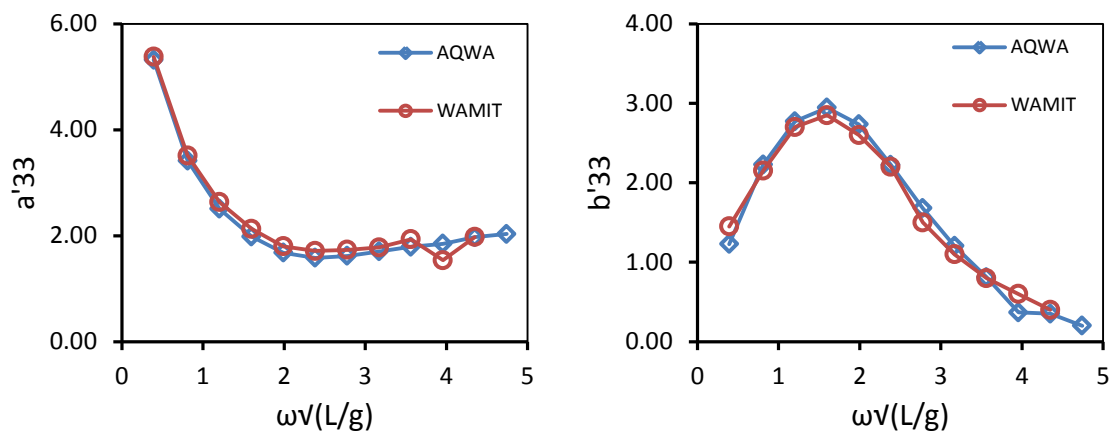


Figura 4.14 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de arfagem. Barcaça Livre. Profundidade 50m.

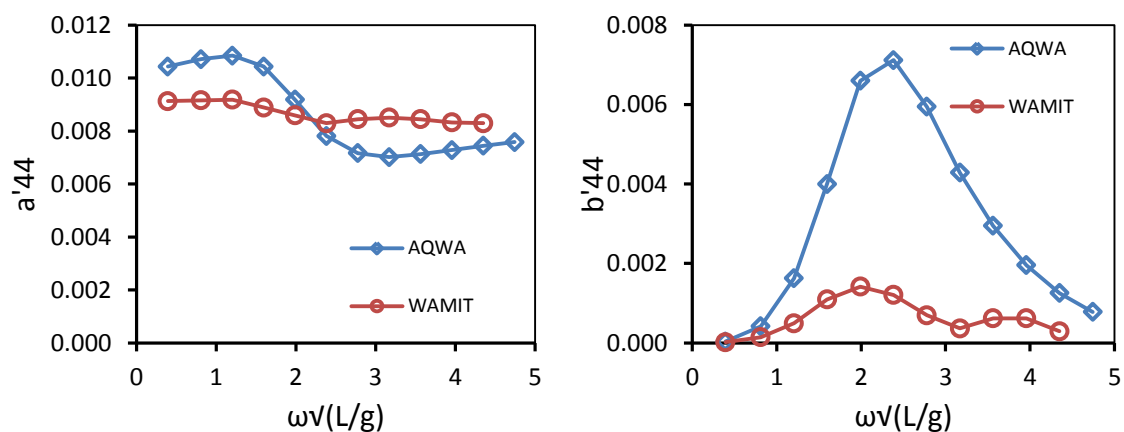


Figura 4.15 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de balanço. Barcaça Livre. Profundidade 50m.

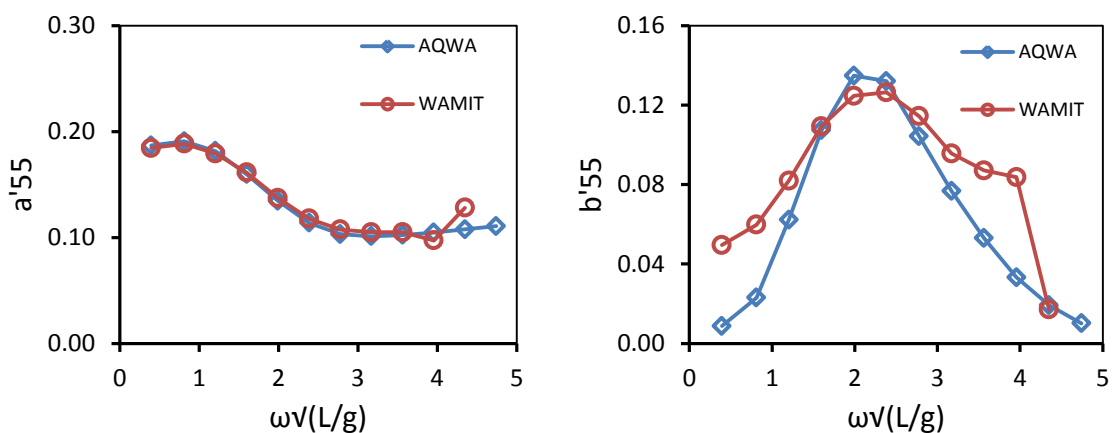


Figura 4.16 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de cabeceio. Barcaça Livre. Profundidade 50m.

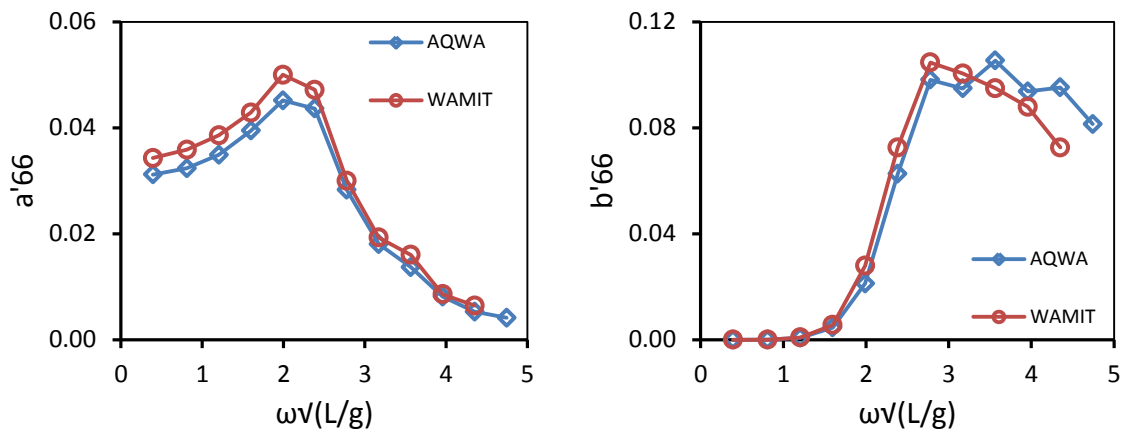


Figura 4.17 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de guinada. Barcaça Livre. Profundidade 50m.

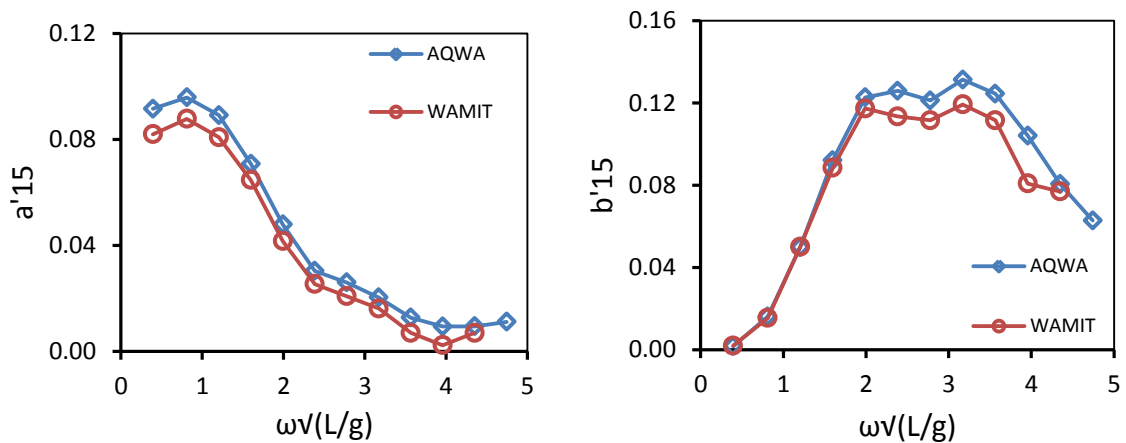


Figura 4.18 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o acoplamento entre o modo de avanço e o modo de cabeceio. Barcaça Livre. Profundidade 50m.

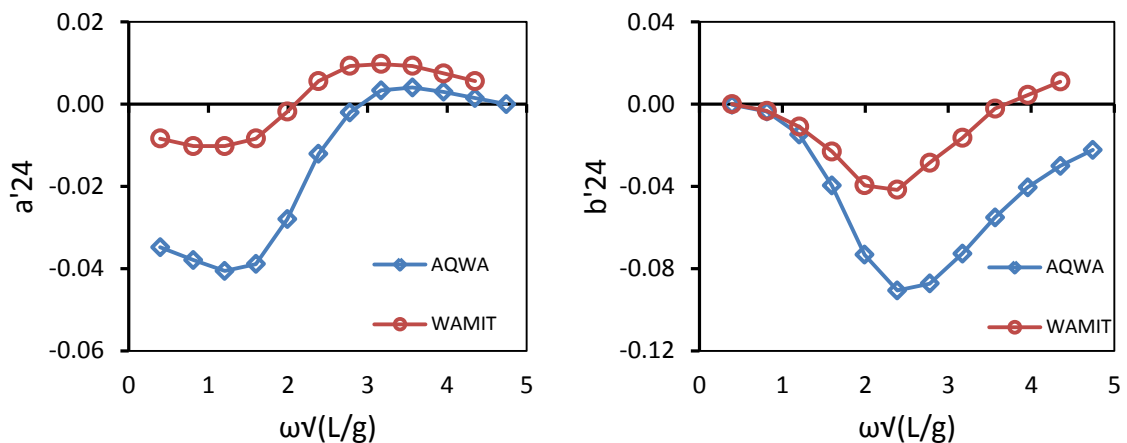


Figura 4.19 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o acoplamento entre o modo de deriva e o modo de balanço. Barcaça Livre. Profundidade 50m.

Uma das causas para eventuais discrepâncias existentes nas comparações dos resultados obtidos em modelos físicos e modelos numéricos prende-se com a existência de frequências irregulares nos

modelos numéricos. No entanto e, assumindo que o WAMIT tinha, à data da referida simulação, capacidade para remover estas frequências, este fator não influencia qualquer comparação entre os resultados obtidos por este software e pelo AQWA, pelo que não será este o motivo para as diferenças verificadas entre os resultados obtidos. Ainda assim, importa abordar este tema superficialmente, de modo a entender-se o modo como o AQWA lida com a existência destas frequências.

A ocorrência de frequências irregulares em análises hidrodinâmicas transientes, cujas características variam no tempo, de estruturas flutuantes, utilizando métodos BIEM (*Boundary Integral Equation Methods*), pode provocar erros significativos nas soluções obtidas para um intervalo de frequências considerável em redor destas frequências (ANSYS, 2012).

Para remover as frequências irregulares, o AQWA utiliza o método de “tampa interna” (*internal lid*) aquando da formulação das equações integrais em termos de distribuição de fontes ou dipolos, assumindo a existência de um campo de escoamento interior à superfície molhada média do corpo, que satisfaz a mesma condição de fronteira da superfície livre aplicada ao corpo flutuante. Assim, o software representa esta superfície livre média interior através de uma série de painéis (painéis interiores LID). A integração da distribuição de fontes original é estendida para se sobrepor, tanto à superfície molhada média do casco, como à superfície livre média interior imaginária.

Analisando as Figuras (4.5) a (4.11), conclui-se que as maiores diferenças surgem associadas ao modo de balanço, nomeadamente nos coeficientes de amortecimento. De facto, o amortecimento por radiação para o modo de balanço é muito reduzido (i.e., a agitação produzida quando a oscilação de balanço é excitada é pouco significativa), logo, o amortecimento viscoso pode tornar-se relevante. Este amortecimento pode ter várias contribuições (Chakrabarti, 2000):

- Perda de energia na camada-limite formada em torno da superfície do corpo;
- Formação de turbilhões de esteira;
- Existência de ondas de superfície livre;
- Geração de amortecimento associado ao efeito de sustentação;
- Existência de amortecimento na quilha do corpo.

Sabendo-se que os modelos baseados em métodos BIEM, em que a solução numérica dos problemas de condição fronteira se baseia na discretização da equação integral em painéis, não consideram diretamente a componente viscosa do amortecimento do balanço, a obtenção de coeficientes de amortecimento para o modo de balanço superiores aos estimados com o WAMIT merece destaque. Importa, também, referir que, apesar de ambos os modelos se basearem em métodos similares para o estudo da interação do escoamento com corpos flutuantes, o AQWA utiliza uma versão mais recente (2014/15), distanciando-se do WAMIT (1992/93) em mais de 20 anos.

Por outro lado, é também necessário atender a que, devido à incompatibilidade prática entre a semelhança de Froude e de Reynolds, este tipo de estudos em modelo físico é realizado com base apenas na semelhança de Froude, pelo que os efeitos viscosos não se encontram corretamente reproduzidos, como aliás já se referiu anteriormente. Estes efeitos de escala são tanto maiores quanto mais pequeno for o fator de escala a que o estudo é realizado, sendo que o estudo de Pinkster e Oortmerssen (1997) foi realizado à escala 1/50.

Os efeitos de escala originados pela não utilização da semelhança de Reynolds tendem a tornar o amortecimento viscoso no modelo físico maior do que ele é no protótipo. No entanto, como se referiu anteriormente, a componente viscosa desse amortecimento resulta também das perdas de energia nos turbilhões de esteira que, regra geral, são reproduzidos corretamente no modelo à escala (BMT, 2001).

Como, habitualmente, este fenómeno é dominante relativamente ao anterior, globalmente, não é expectável que o amortecimento viscoso esteja significativamente ampliado no modelo físico (PIANC, 1995).

Atendendo a que não é possível replicar os efeitos deste amortecimento não-linear numa análise no domínio da frequência, o AQWA apenas considera os efeitos da radiação, pelo que a observação da sua influência será remetida para a análise no domínio do tempo, em (4.3.4.8).

4.3.4.3 Força de excitação

No que concerne às forças de excitação, os resultados extraídos do AQWA foram comparados, tanto com os resultados obtidos experimentalmente através da modelação física, como com os resultados numéricos obtidos com o software WAMIT. O Quadro (4.3) apresenta a forma de adimensionalização dos resultados provenientes do AQWA de modo a uniformizar a comparação com os resultados previamente conhecidos. Para além dos parâmetros já apresentados previamente, importa referir que k representa o número de onda, ξ_0 a amplitude da onda, F'_k a força adimensionalizada e F_k a força obtida no modelo AQWA, através da soma da força de difração e de Froude-Krylov.

Quadro 4.3 – Adimensionalização das forças de excitação.

Modo	Força
$k = 1$ $k = 2$ $k = 3$	$F'_k = \frac{F_k}{\rho \cdot \nabla \cdot g \cdot k \cdot \xi_0}$
$k = 4$ $k = 5$ $k = 6$	$F'_k = \frac{F_k}{\rho \cdot \nabla \cdot g \cdot k \cdot \xi_0 \cdot L}$

As Figuras (4.20) a (4.25) apresentam os resultados obtidos para as forças de excitação para os seis graus de liberdade da barçaça.

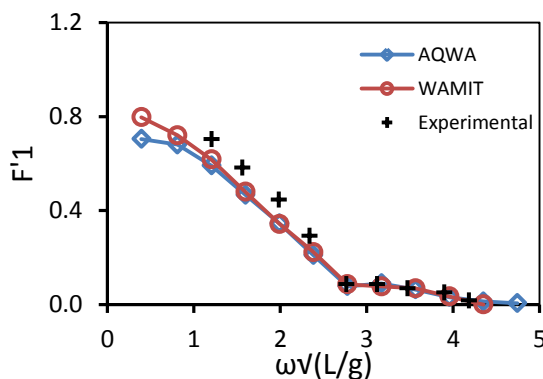


Figura 4.20 – Força de excitação para o modo de avanço.

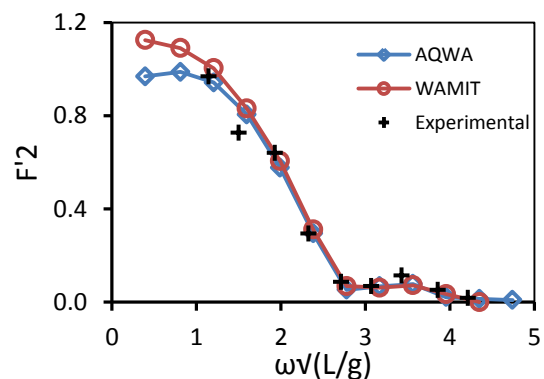


Figura 2.21 – Força de excitação para o modo de deriva.

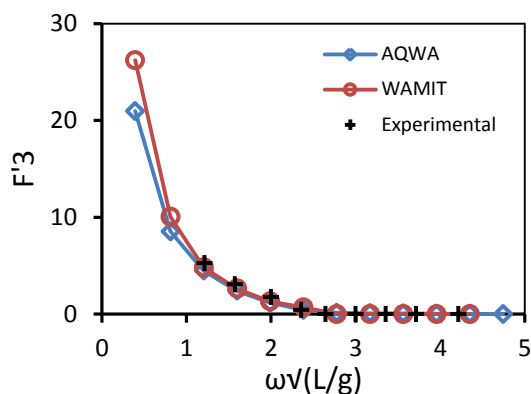


Figura 4.22 – Força de excitação para o modo de arfagem.

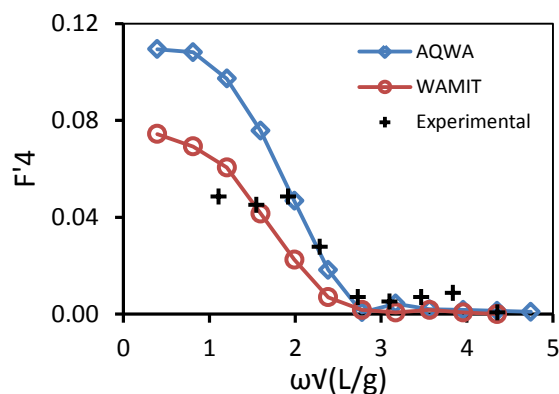


Figura 4.23 – Força de excitação para o modo de balanço.

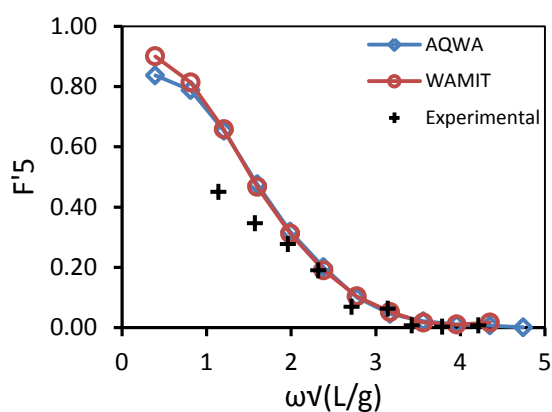


Figura 4.24 – Força de excitação para o modo de cabeceio.

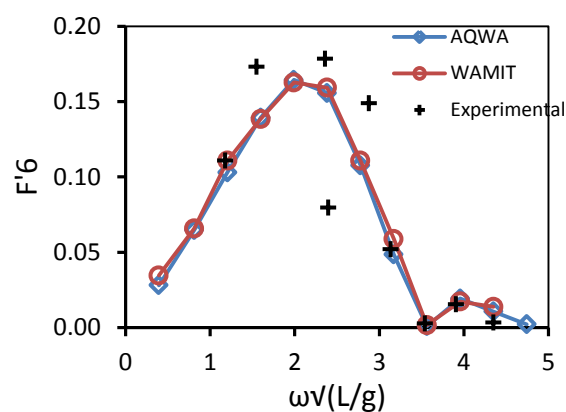


Figura 4.25 – Força de excitação para o modo de guinada.

Tal como se pode verificar, os resultados para as forças de excitação determinadas para ondas propagando-se a 135° revelaram uma concordância bastante razoável, verificando-se, ainda assim e novamente, uma discrepância para o modo de balanço, entre os resultados obtidos pelo WAMIT e pelo AQWA, com este último a apresentar valores superiores para frequências inferiores a sensivelmente 0.11 Hz. Se se comparar agora os valores obtidos em modelação numérica com os obtidos no modelo físico, verifica-se que, para frequências inferiores a cerca de 0.085 Hz, os valores do WAMIT encontram-se mais próximos dos obtidos experimentalmente, do que os apresentados pelo AQWA. Por outro lado, para frequências superiores a 0.085 Hz, os resultados experimentais estão mais próximos dos valores obtidos no modelo numérico mais recente. A simulação da barcaça para um número superior de frequências, dentro da mesma gama, seria importante para se entender, com maior precisão, se as diferenças verificadas se atenuariam ou não.

É ainda possível afirmar, relativamente às diferenças entre os resultados experimentais e os obtidos através da modelação numérica, que estas são tanto maiores quanto menor for a ordem de grandeza dos valores registados e quanto maior for a distância dos painéis ao eixo considerado. De facto, para o modo de guinada, onde se observa uma discrepância maior entre os valores referidos, é importante explicar que, para além da ordem de grandeza dos valores ser muito reduzida, as eventuais diferenças

que possam existir nas pressões ao longo dos painéis podem ser bastante ampliadas no cálculo do momento, devido à distância dos painéis ao eixo dos zz , que pode ir até 75 m (Santos, 1993).

4.3.4.4 Movimentos oscilatórios

Por fim, foram comparados os resultados para os movimentos da barça, obtidos no AQWA através dos RAO (*Response Amplitude Operators*).

A adimensionalização dos resultados provenientes do AQWA para as oscilações da barça foi realizada dividindo os valores obtidos pela amplitude da onda (ξ_0). As Figuras (4.26) a (4.31) apresentam os resultados obtidos.

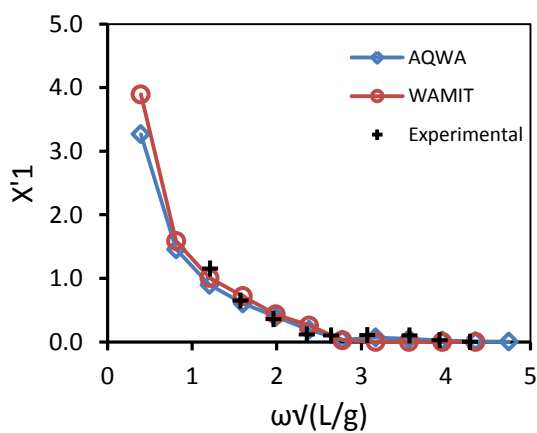


Figura 4.26 – Movimento da barça livre para o modo de avanço.

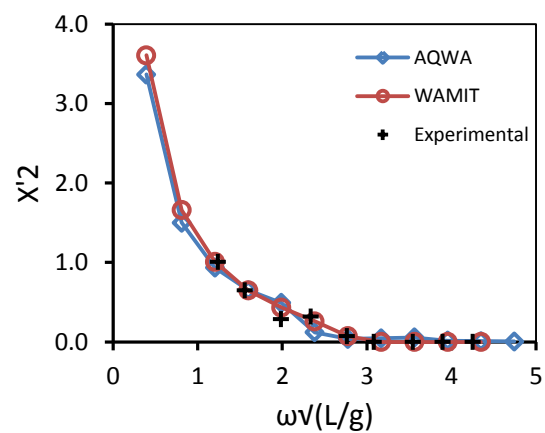


Figura 4.27 – Movimento da barça livre para o modo de deriva.

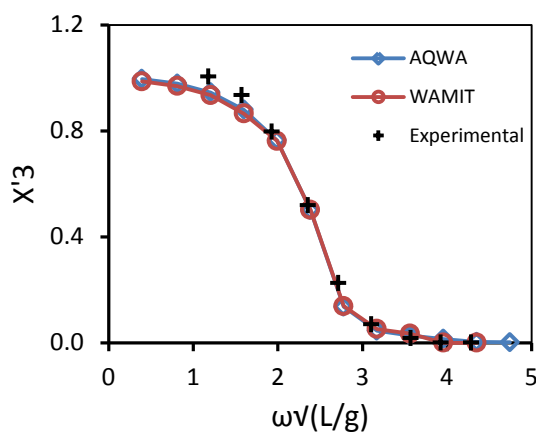


Figura 4.28 – Movimento da barça livre para o modo de arfagem.

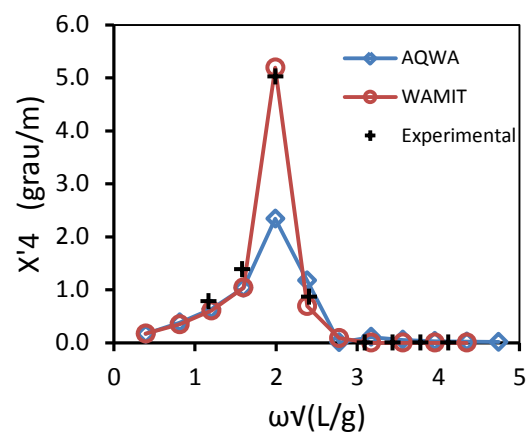


Figura 4.29 – Movimento da barça livre para o modo de balanço.

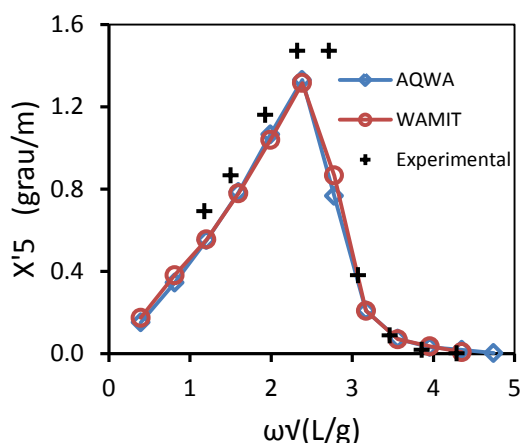


Figura 4.30 – Movimento da barça livre para o modo de cabeceio.

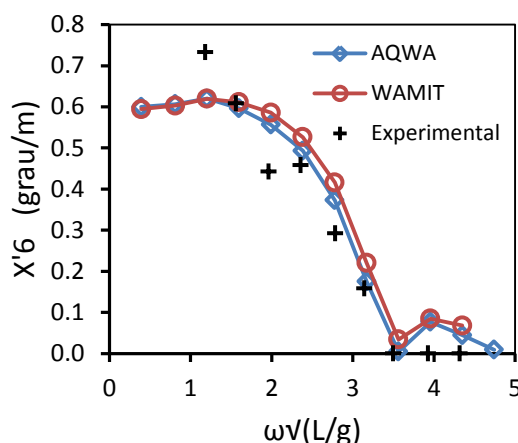


Figura 4.31 – Movimento da barça livre para o modo de guinada.

Relativamente aos movimentos oscilatórios, segundo os seis graus de liberdade da barça, a concordância com resultados obtidos no WAMIT não foge ao padrão dos outros parâmetros analisados anteriormente, revelando-se extremamente satisfatória para todos os modos, menos para o modo de balanço, nomeadamente numa zona perto da frequência de pico, tal como se pode observar nas Figuras (4.18) a (4.23).

De facto, os resultados obtidos no AQWA para a oscilação de balanço não são de estranhar, uma vez que em (4.3.4.2) já se tinha verificado que os coeficientes de amortecimento estimados por este modelo para o modo de balanço eram mais elevados do que os obtidos com o WAMIT, que tinha sido validado com os resultados experimentais obtidos por Pinkster e Oortmerssen (1977).

Já no que diz respeito às diferenças obtidas entre a modelação numérica e a modelação física, será verificado posteriormente, se a simulação, no AQWA, para um maior número de frequências, minimiza essas mesmas discrepâncias.

4.3.4.5 Influência da malha

Já foi mencionado que a qualidade da discretização da superfície pode afetar decisivamente a precisão dos resultados finais obtidos numa qualquer análise hidrodinâmica. Por outro lado, quanto maior for o número de painéis utilizado, maiores serão os requisitos em termos computacionais. É, portanto, necessário chegar a uma solução de compromisso. Assim, o AQWA impõe alguns requisitos no que à malha diz respeito:

- A superfície do corpo, neste caso o casco da embarcação, deve ser representada por um número suficiente de painéis quadrangulares ou triangulares;
- A normal a cada painel deve estar na direção do fluido envolvente;
- A superfície do casco, particularmente a superfície molhada média, deve estar completamente coberta de painéis, sem falhas ou sobreposições;
- Os painéis não podem atravessar a superfície livre de água, ou seja, quando um mesmo painel contém uma parte submersa e outra emersa, o mesmo deve ser dividido em dois painéis distintos, um submerso e outro emerso;

- A relação entre a área de cada painel e a área do painel adjacente deve situar-se no seguinte intervalo: $\frac{1}{3} \leq \frac{\Delta S_m}{\Delta S_k} \leq 3$, em que ΔS_m representa a área do painel e ΔS_k representa a área do painel adjacente;
- O aspeto de cada painel não deve ser demasiado reduzido, de tal forma que: $C \cdot \Delta S_m / L_{máx}^2 \geq 1/3$, em que $L_{máx}$ representa o comprimento da maior aresta do painel e C é igual a 1.0 para painéis quadrangulares e 2.3 para painéis triangulares;
- O centro de cada painel não deve estar demasiado próximo do painel adjacente, de forma a que: $d_{mk} \geq r_{fm}$, em que d_{mk} representa a distância entre um painel e o painel adjacente e r_{fm} representa o raio do painel, definido como $r_{fm} = \sqrt{\frac{\Delta S_m}{\pi}}$;
- O tamanho de cada painel deve ser pequeno em comparação com o comprimento de onda, de forma a que, $L_{máx} \leq \frac{1}{7} \lambda$, em que λ representa o comprimento de onda.

Estas condições impostas pelo AQWA têm como objetivo garantir uma qualidade razoável para a malha e, consequentemente, uma precisão adequada para os resultados. A imposição destas condições implica à partida que, qualquer discrepância mais relevante, verificada na comparação com resultados anteriormente conhecidos e validados, não será resultado de uma deficiente painelização.

A malha básica é definida em função de dois fatores: “Dimensão Máxima do Elemento” (*Max Element Size*) e “Tolerância na Discretização” (*Defeaturing Tolerance*).

O primeiro diz respeito, tal como o próprio nome indica, à dimensão máxima dos elementos que serão gerados. No AQWA, este valor está diretamente relacionado com o valor da maior frequência que se pretenda analisar, sendo que a definição de um implicará automaticamente o valor do outro. Atenda-se, neste ponto, ao facto de que quanto maior for a frequência, menor será o período e o comprimento de onda.

Por seu lado, a “Tolerância na Discretização” controla a dimensão de cada pormenor da malha, estabelecendo um valor mínimo. Se um qualquer pormenor num painel for inferior ao valor estabelecido para a tolerância, o painel adjacente estender-se-á sobre o primeiro, impedindo a geração de uma malha correta. Perante esta situação, é possível discriminar o tamanho da malha no referido elemento, definindo a dimensão local do mesmo, através do comando “Dimensionamento da Malha” (*Mesh Sizing*). No AQWA, o valor dessa tolerância não pode ser superior a 0.6 vezes a “Dimensão Máxima do Elemento”.

A opção “Tipo de Malha” (*Meshing Type*) controla o algoritmo utilizado na geração da malha. Por definição, esta opção encontra-se controlada pelo AQWA (*Program Controlled*), utilizando uma malha de superfície (*Surface Only Meshing*) para estruturas definidas apenas pelo seu contorno e uma malha combinada (*Combine Meshing*) para estruturas sólidas. É possível definir os diferentes parâmetros manualmente, solução indispensável para diversos casos em que a definição automática não é capaz de identificar pormenores específicos e, consequentemente, de gerar a malha.

De forma a verificar a influência da malha nas análises efetuadas previamente, foram repetidos os testes, mas desta vez aplicando uma malha mais refinada, através da opção *Advanced Meshing*, com as características apresentadas no Quadro (4.4).

Quadro 4.4 – Características da malha com a opção *Advanced Meshing*.

Advance Size Function	Growth Rate	Span Angle Center	Defeaturing tolerance (m)	Min Face Size (m)	Max Face Size (m)	Max Allowed Frequency (Hz)	Number of Elements
Proximity and Curvature	1.2	Fine (30°)	0.7779	1.0373	5.1863	0.268	5821

A primeira definição implica a utilização de uma função de dimensionamento avançada (*Advanced Size Function – ASF*), que permite melhorar a qualidade da malha nas extremidades, baseando-se no ângulo de curvatura normal (*Curvature*) ou nas relações de proximidade com as regiões adjacentes (*Proximity*), o que permite reduzir as falhas na malha. O AQWA permite, quando selecionado, aplicar os dois métodos em simultâneo de acordo com as características de cada elemento. As Figuras (4.32) a (4.34) permitem perceber a diferença entre cada uma destas opções.

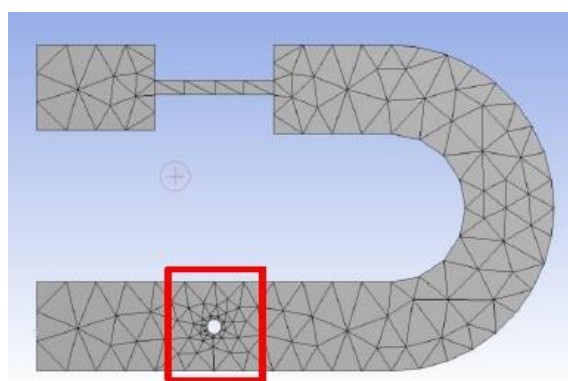
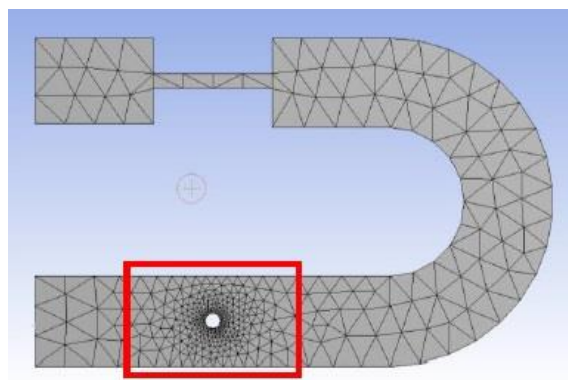


Figura 4.32 – Malha sem comando ASF ativado (adaptado do ANSYS Meshing Introduction 15.0).

Figura 4.33 – Malha com comando ASF ativado em *Curvature* (adaptado do ANSYS Meshing Introduction 15.0).

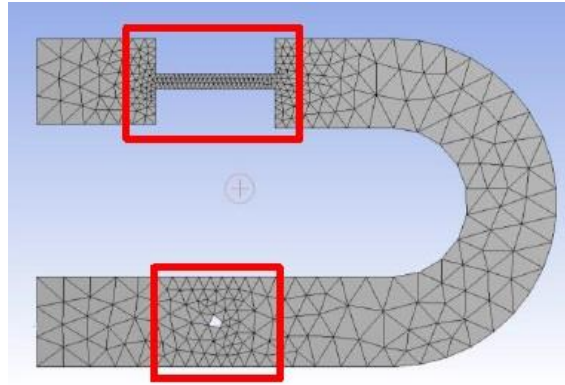


Figura 4.34 – Malha com comando ASF ativado em *Proximity* (adaptado do ANSYS Meshing Introduction 15.0).

A opção *Growth Rate* (GR) permite definir a taxa de crescimento da dimensão dos painéis e baseia-se no rácio entre o tamanho do lado do painel adjacente e o do painel anterior. Quanto maior for o valor de GR, mais rápido é o fator de crescimento dos painéis e, consequentemente, menor é o número final de elementos da malha.

O refinamento das extremidades é controlado pela definição *Span Angle Center*, que pode ser fixada numa de três opções, tendo por base a amplitude do ângulo de expansão (*SA*): *coarsed* (abrupta) – *SA* entre 91° e 60°; *medium* (média) – *SA* entre 75° e 24°; *fine* (fina) – *SA* entre 36° e 12°. As Figuras (4.35) a (4.37) demonstram a diferença entre cada uma das opções apresentadas.

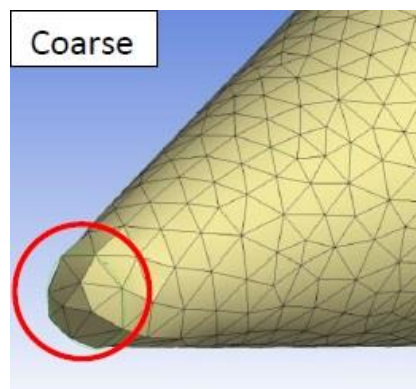


Figura 4.35 – Malha com *SA* definido em *Coarse* (adaptado do ANSYS Meshing Introduction 15.0).

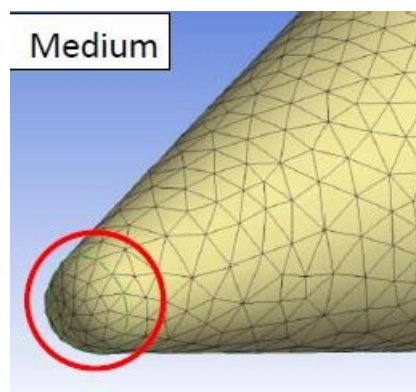


Figura 4.36 – Malha com *SA* definido em *Medium* (adaptado do ANSYS Meshing Introduction 15.0).

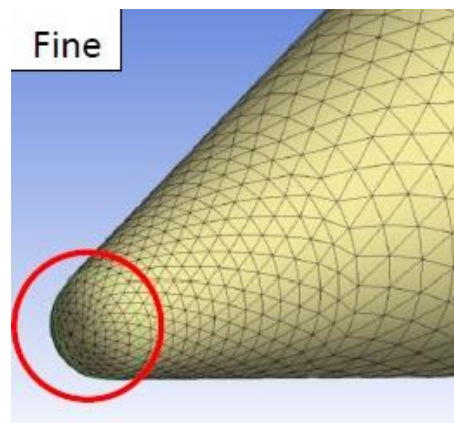


Figura 4.37 – Malha com SA definido em *Fine* (adaptado do ANSYS Meshing Introduction 15.0).

Foi ainda seleccionada a opção *Automatic Mesh Based Defeaturing*, permitindo que o AQWA remova os pormenores de dimensão inferior ao valor estabelecido na *Defeating Tolerance*.

A Figura (4.38) apresenta a malha considerada com a opção *Advanced Meshing*.

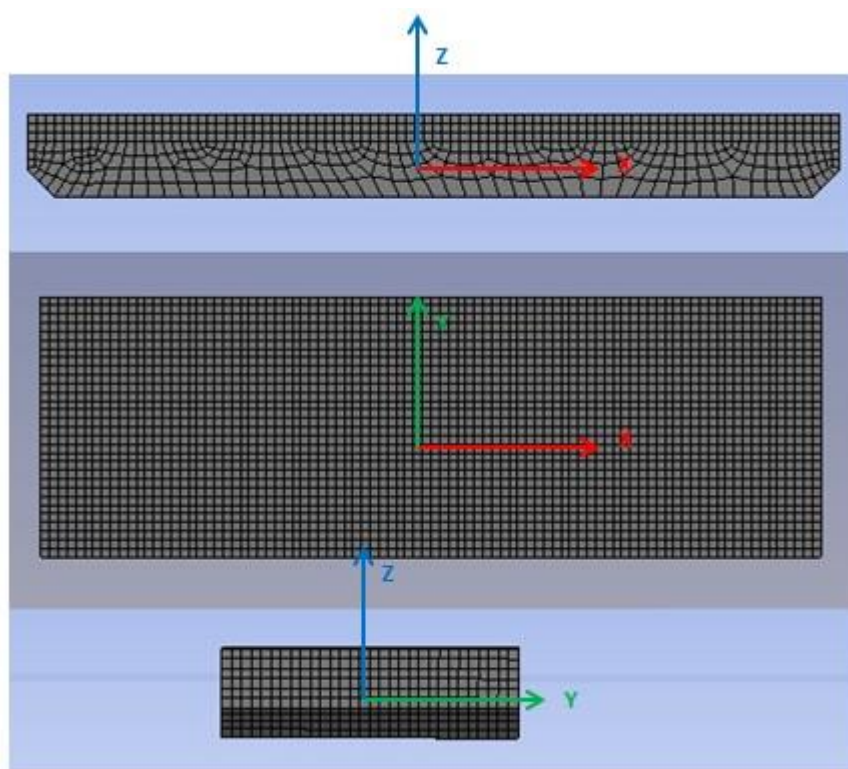


Figura 4.38 – Malha da barça com a opção *Advanced Meshing*

Figuras (4.39 a 4.44) apresentam a comparação entre os resultados obtidos com esta nova malha e os determinados com a malha anterior, para as mesmas condições de teste, para os parâmetros onde se verificou uma maior discrepância: a'_{44} , b'_{44} , a'_{24} , b'_{24} , F'_4 e X'_4 .

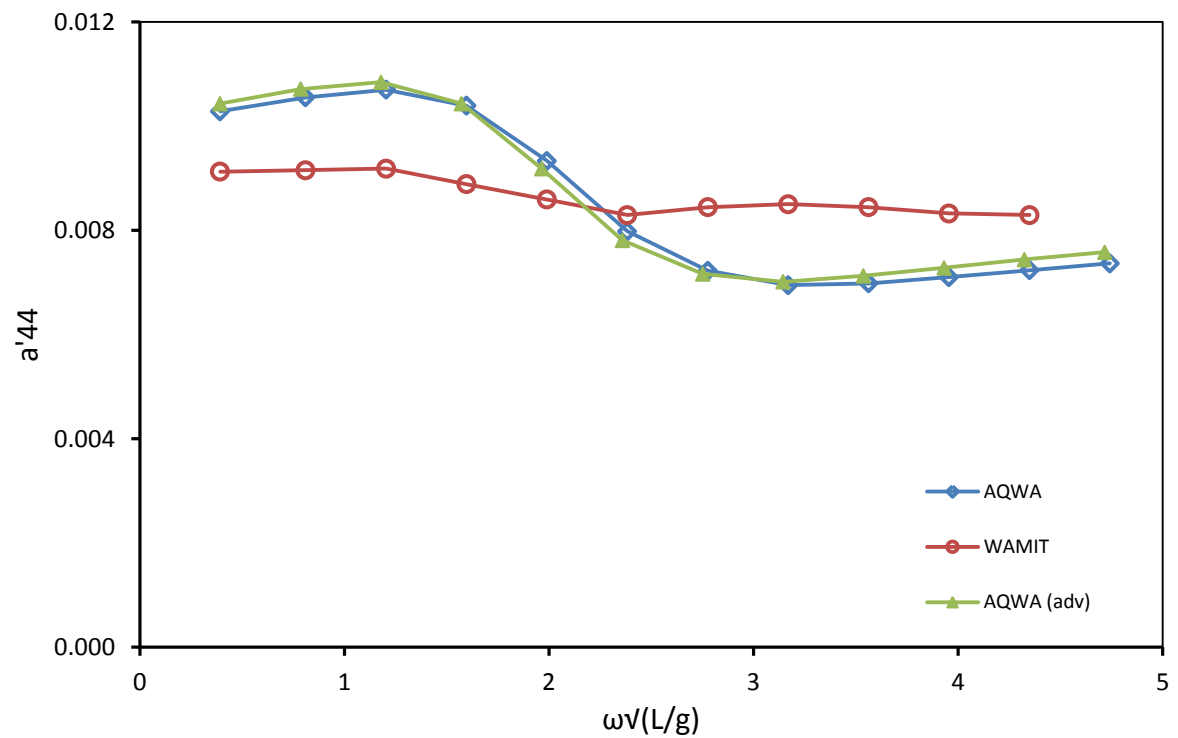


Figura 4.39 – Comparação entre a malha original e a malha gerada com a opção *Advanced Meshing*. Massa adicionada. Modo de balanço.

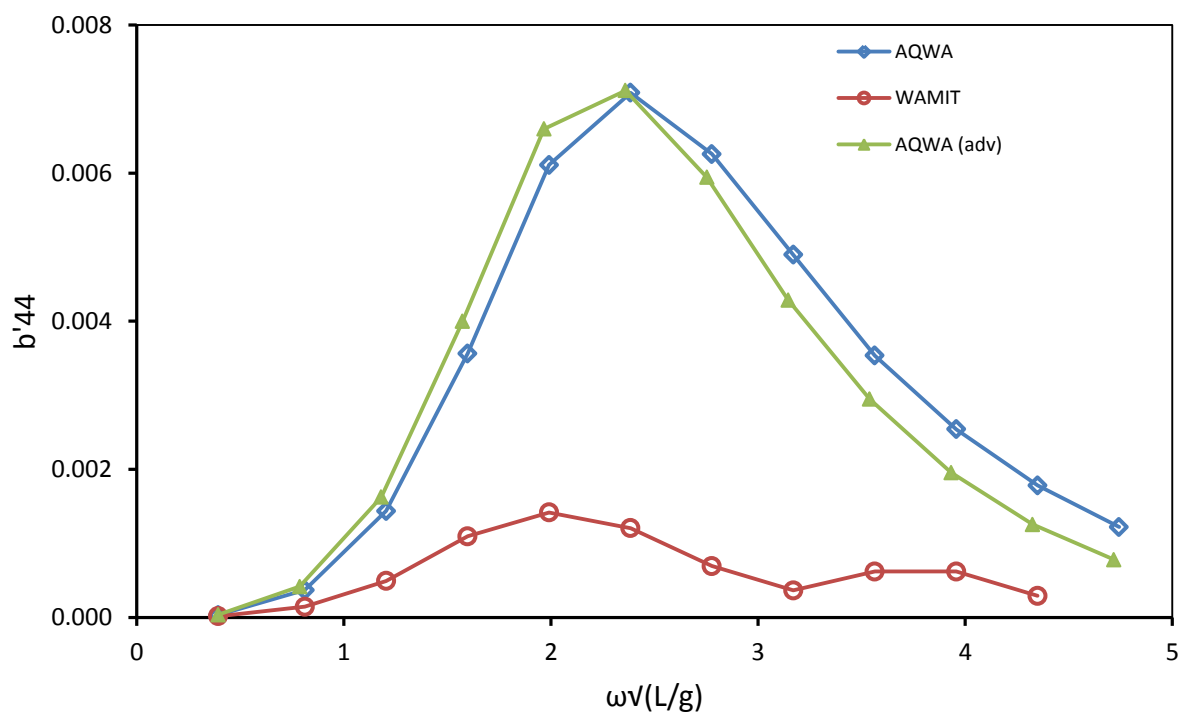


Figura 4.40 – Comparação entre a malha original e a malha gerada com a opção *Advanced Meshing*. Amortecimento. Modo de balanço.

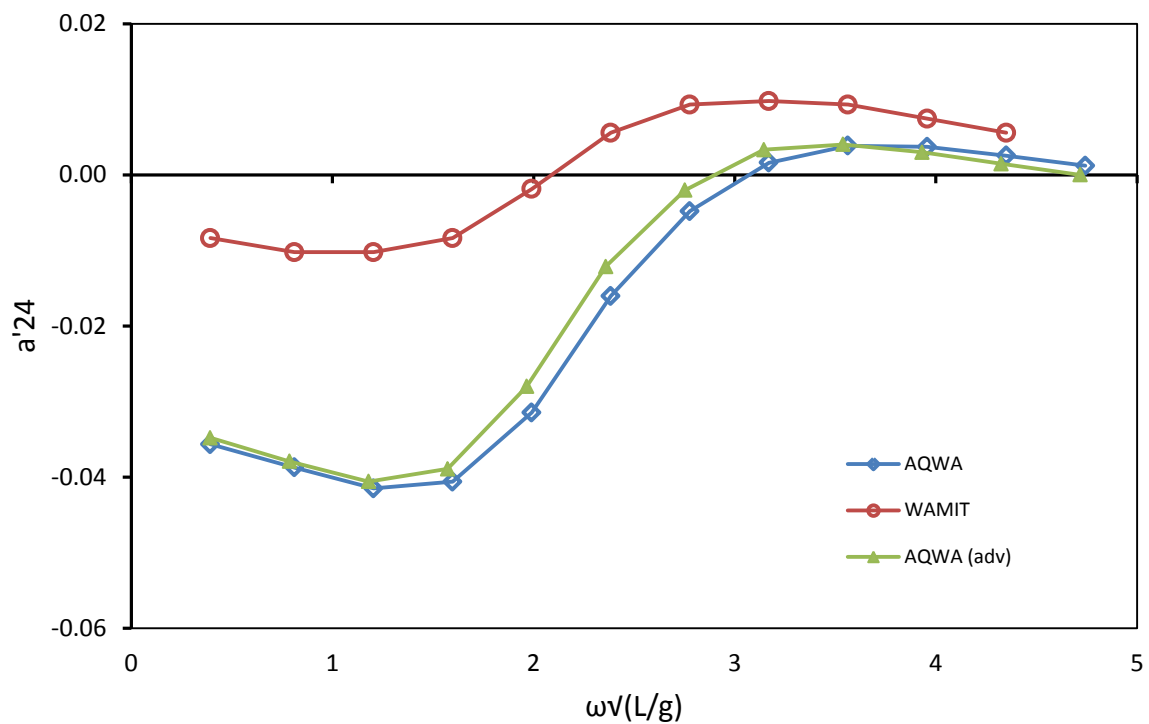


Figura 4.41 – Comparação entre a malha original e a malha gerada com a opção *Advanced Meshing*. Massa adicionada. Acoplamento entre deriva e balanço.

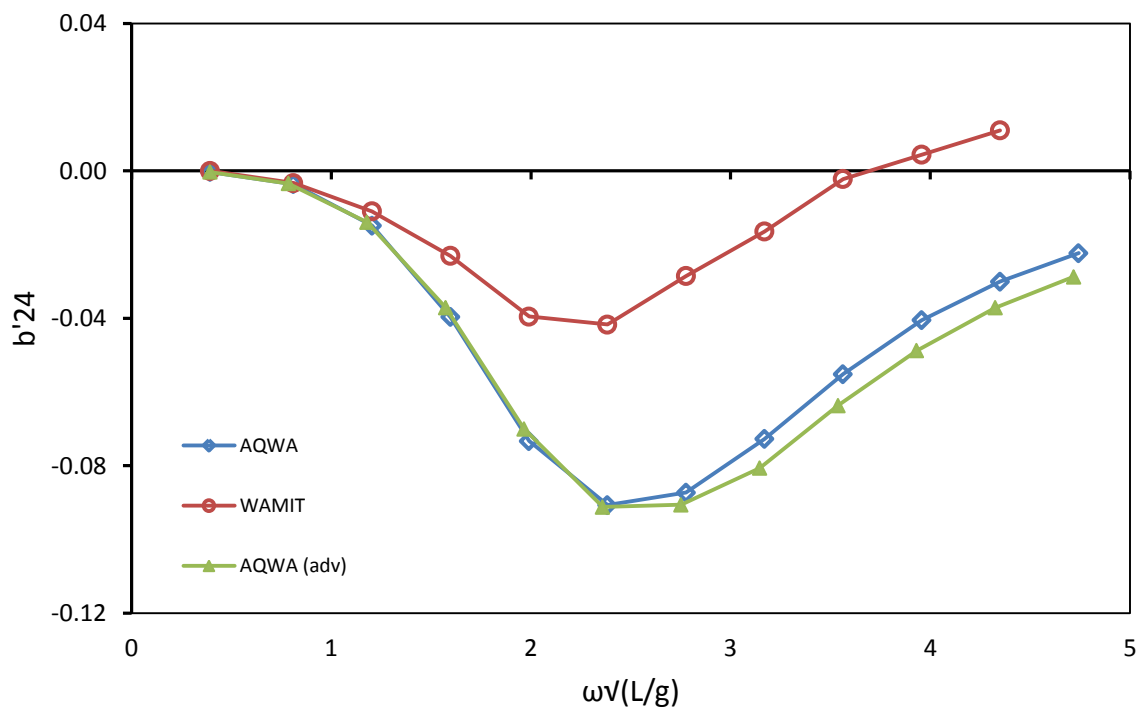


Figura 4.42 – Comparação entre a malha original e a malha gerada com a opção *Advanced Meshing*. Amortecimento. Acoplamento entre deriva e balanço.

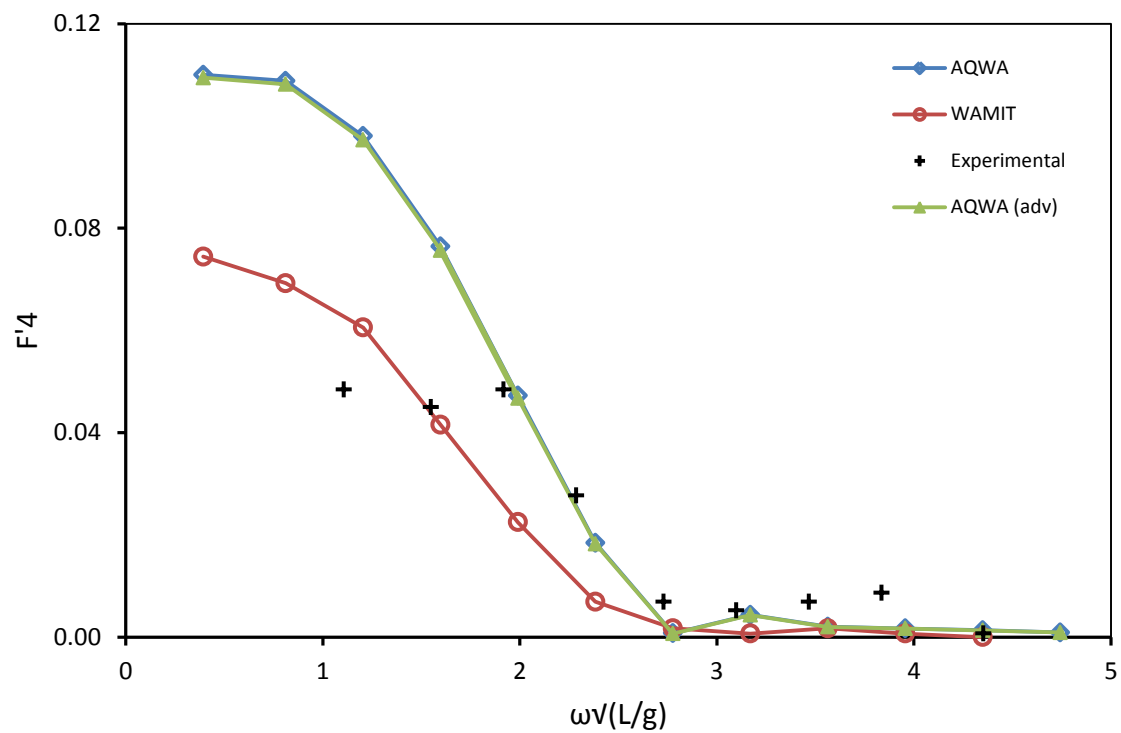


Figura 4.43 – Comparação entre a malha original e a malha gerada com a opção *Advanced Meshing*. Forças de excitação. Modo de balanço.

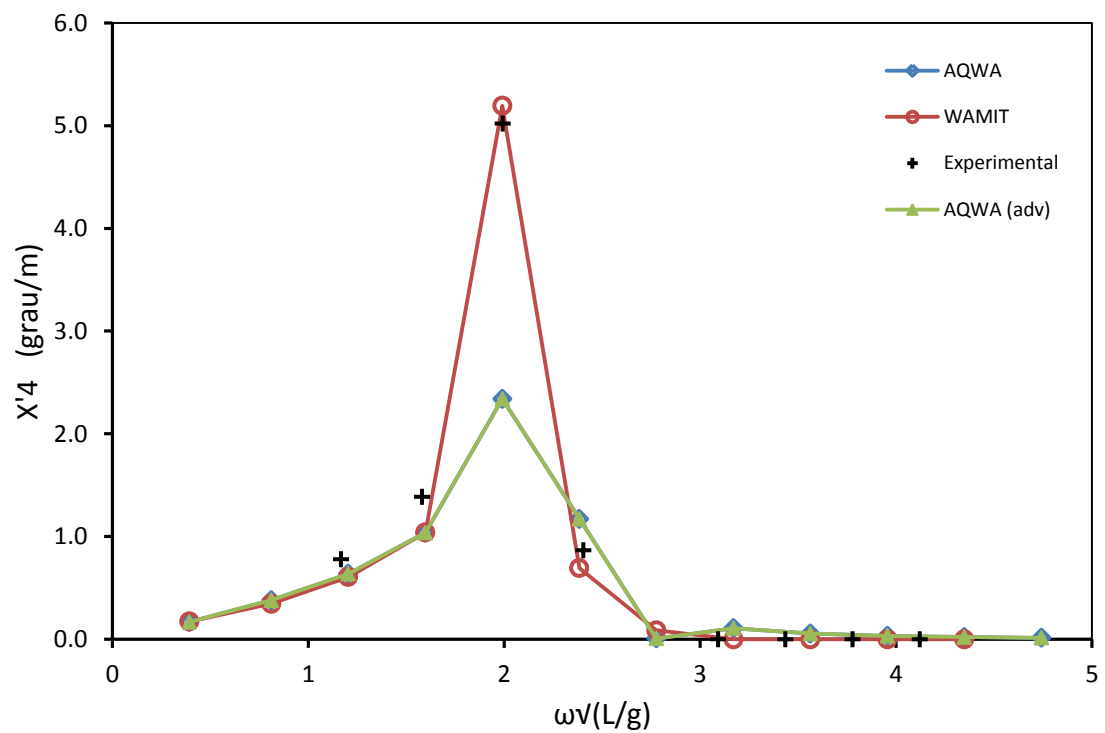


Figura 4.44 – Comparação entre a malha original e a malha gerada com a opção *Advanced Meshing*. Movimentos da barcaça livre. Modo de balanço.

Conforme seria de esperar, pelo referido anteriormente, as diferenças são residuais ou mesmo inexistentes, pelo que se pode concluir que a discrepância para os resultados apresentados por Santos (1993) não provém da painelização.

No entanto, convém referir que, atendendo à distância temporal entre os dois modelos, será de esperar que a painelização efetuada no AQWA seja melhor do que a utilizada em 1993, no WAMIT. As melhorias computacionais entre os tempos de comparação são suficientemente significativas para permitir que se realize uma painelização com mais elementos, com uma melhor distribuição, ou ainda com uma malha mais eficiente ao nível da discretização.

4.3.4.6 Influência da posição do centro de gravidade

Numa tentativa de perceber as diferenças entre os resultados obtidos e os resultados usados como termo de comparação, foi analisada a influência da posição do centro de gravidade.

Conforme foi referido anteriormente e, na ausência de informação a esse respeito, nos testes realizados com o modelo AQWA considerou-se que o centro de gravidade da barça se encontrava a 5 m de profundidade, em (0, 0, -5), sendo que a origem do referencial se encontra no centro da projeção vertical da barça, ao nível da superfície livre marítima.

Para os novos testes, consideraram-se duas alturas (Z_{cog}) para o centro de gravidade (COG): primeiro, a 1 m de profundidade e, posteriormente, à altura da superfície livre de água (0 m). Assim, consideraram-se as novas posições do centro de gravidade em (0, 0, -1) e (0, 0, 0).

As Figuras (4.45) a (4.50) apresentam os resultados obtidos.

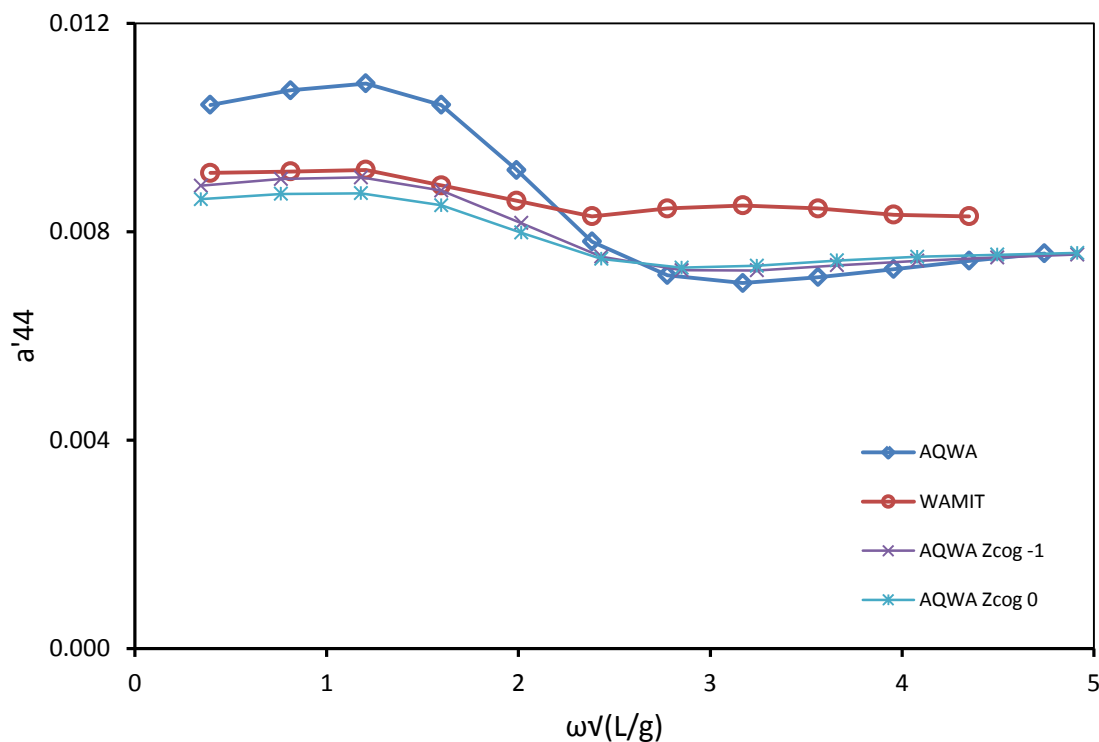


Figura 4.45 – Comparação entre consideração do Z_{cog} a -5 m, -1 m e 0 m. Massa adicionada. Modo de balanço.

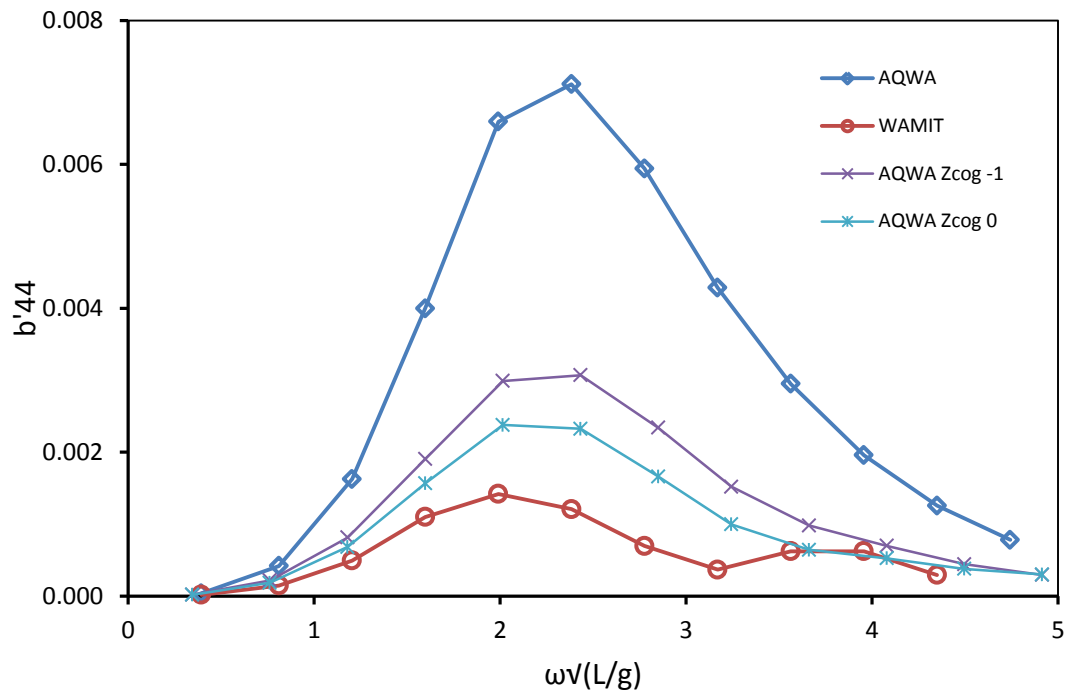


Figura 4.46 – Comparação entre consideração do Zcog a -5 m, -1 m e 0 m. Amortecimento. Modo de balanço.

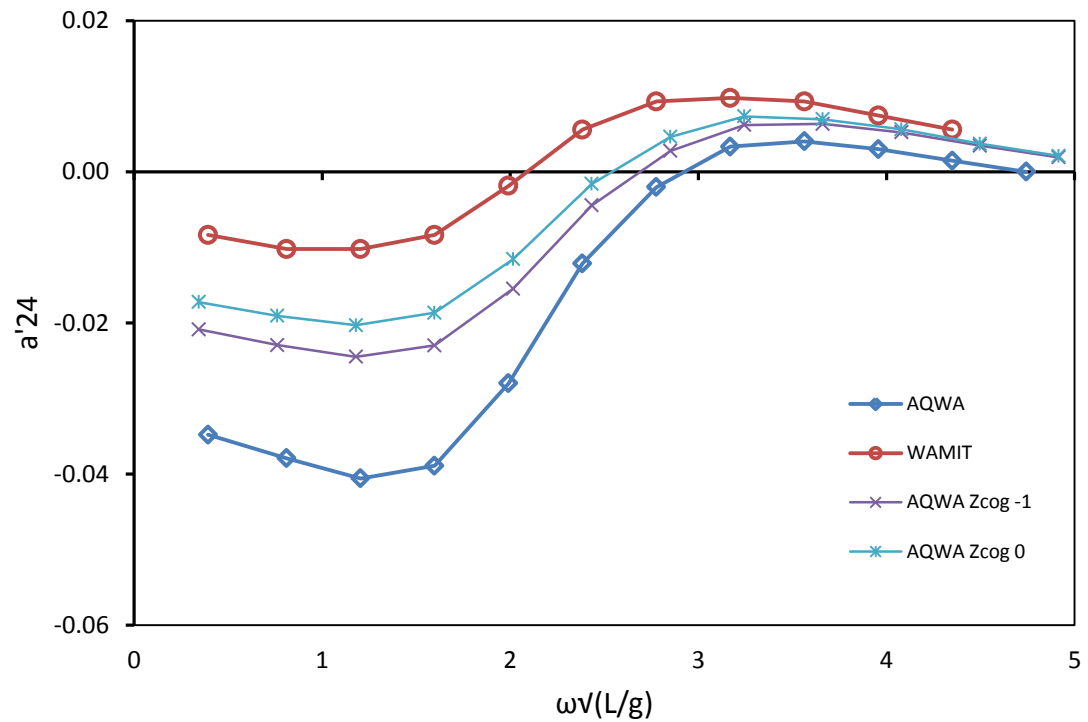


Figura 4.47 – Comparação entre consideração do Zcog a -5 m, -1 m e 0 m. Massa adicionada. Acoplamento entre modo de deriva e modo de balanço.

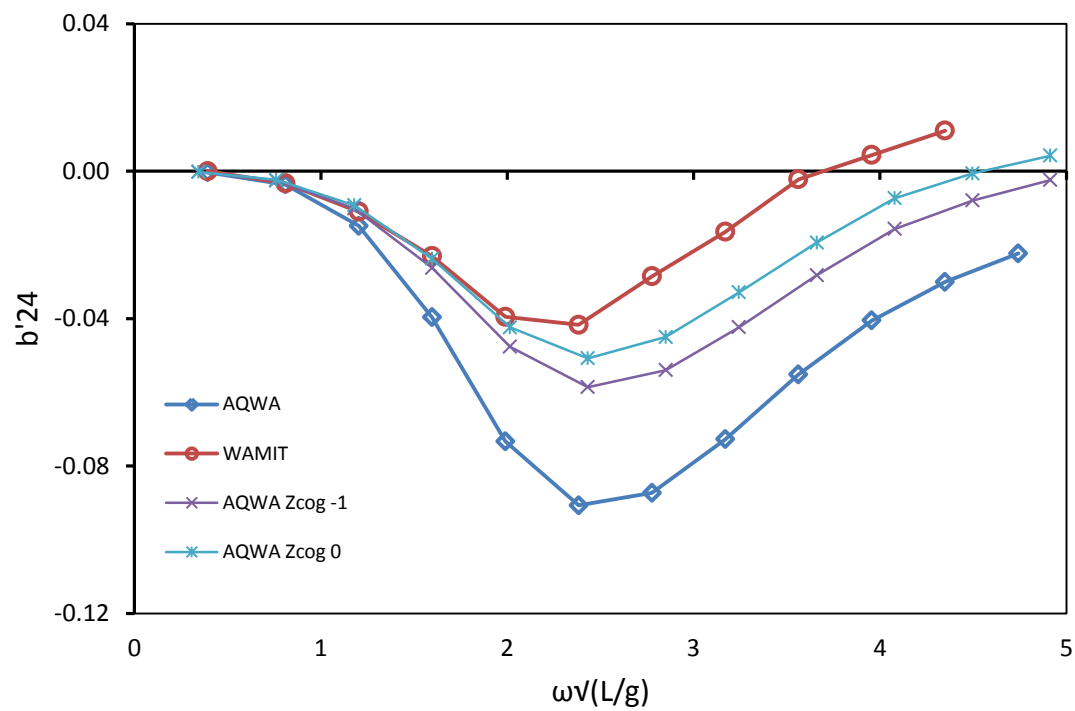


Figura 4.48 – Comparação entre consideração do Zcog a -5 m, -1 m e 0 m. Amortecimento. Acoplamento entre modo de deriva e modo de balanço.

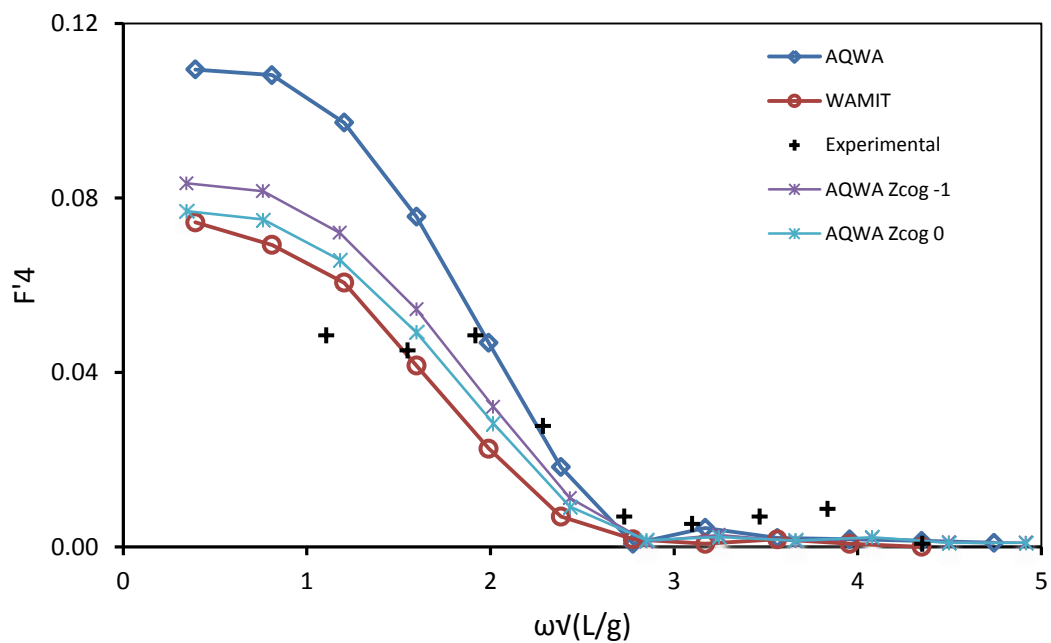


Figura 4.49 – Comparação entre consideração do Zcog a -5 m, -1 m e 0 m. Forças de excitação. Modo de balanço.

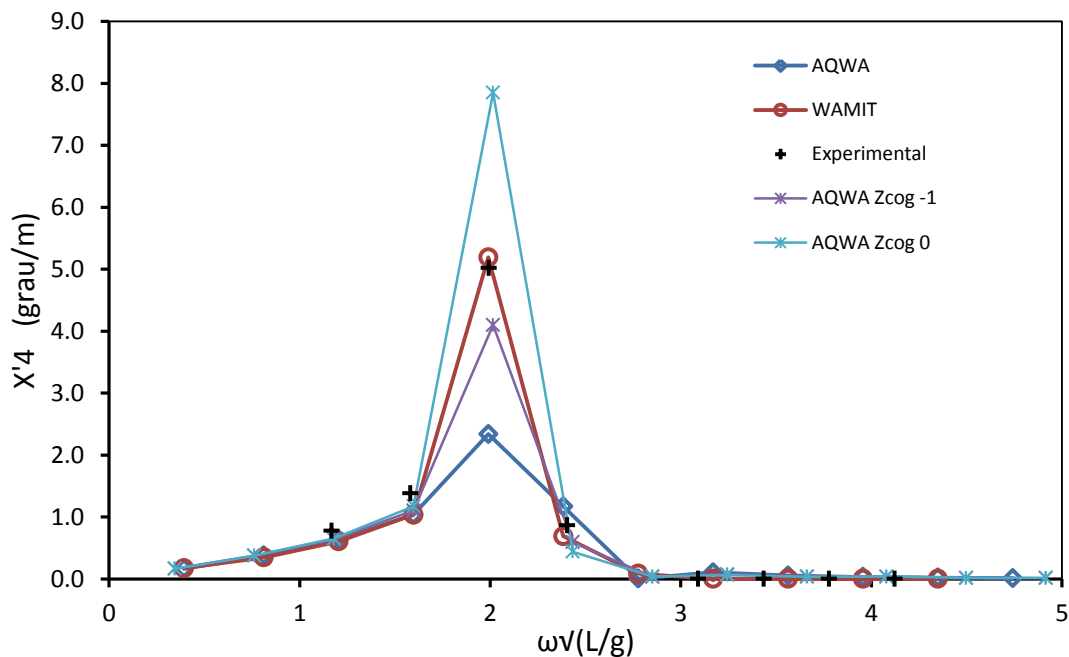


Figura 4.50 – Comparação entre consideração do Zcog a -5 m, -1 m e 0 m. Movimentos da barça livre. Modo de balanço.

Analisando os gráficos anteriores, é possível verificar melhorias significativas nas comparações realizadas, tanto quando são tidos em conta os resultados obtidos experimentalmente, como pelo WAMIT. Com efeito, na globalidade, pode-se afirmar que uma redução da profundidade do centro de gravidade aumenta a concordância entre os resultados obtidos no AQWA e no WAMIT. A exceção prende-se com a oscilação no modo de balanço, onde a consideração do centro de gravidade à altura da superfície livre de água implicou movimentos superiores aos obtidos, tanto anteriormente no AQWA, com a consideração do centro de gravidade a 5 m de profundidade, como no WAMIT, diminuindo assim a estabilidade da barça.

Para além dos gráficos apresentados, importa referir que todos os resultados comparados para as massas adicionadas, coeficientes de amortecimento, forças de excitação e movimentos oscilatórios, apresentam melhorias, ainda que menos significativas, uma vez que a concordância dos restantes valores era já bastante satisfatória. Estes resultados e consequentes comparações apresentam-se no anexo B.

Desta forma e, analisando as implicações provocadas pelas alterações da posição do centro de gravidade, é possível concluir que, eventuais diferenças no desenho geométrico da parte superior da barça, cujas dimensões exatas não são apresentadas nos trabalhos anteriores, ou mesmo nas condições de flutuabilidade da barça, podem constituir uma explicação para as discrepâncias verificadas.

4.3.4.7 Influência da quantidade de frequências simuladas

Sabendo que a construção dos gráficos anteriormente apresentados se baseia na união contínua de uma série de valores individuais, a consideração de um número superior de frequências implica automaticamente melhorias na precisão dos resultados globais. Assim, procurando analisar a influência desta alteração na comparação dos resultados obtidos em modelação numérica e em

modelação física, realizaram-se simulações para o mesmo intervalo, mas para cinquenta valores de frequência, número bastante superior ao considerado anteriormente (doze).

Atendendo à concordância verificada em (4.3.4.6), optou-se por definir o centro de gravidade em (0, 0, -1). Assim, foram efetuadas simulações para as forças e para os movimentos oscilatórios nos modos de balanço, cabeceio e guinada, onde a concordância entre os resultados obtidos experimentalmente e os determinados no AQWA, era menor. As Figuras (4.51) a (4.56) apresentam os resultados obtidos, sendo que *F50* representa a série de valores para as cinquenta frequências calculadas.

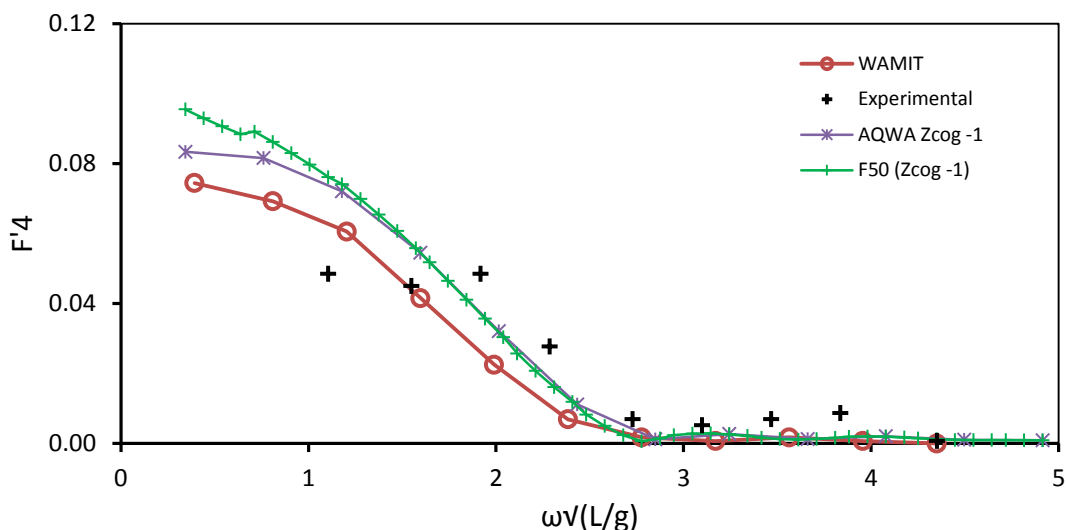


Figura 4.51 – Comparação entre consideração de doze e de cinquenta valores de frequência. Forças de Excitação. Modo de balanço.

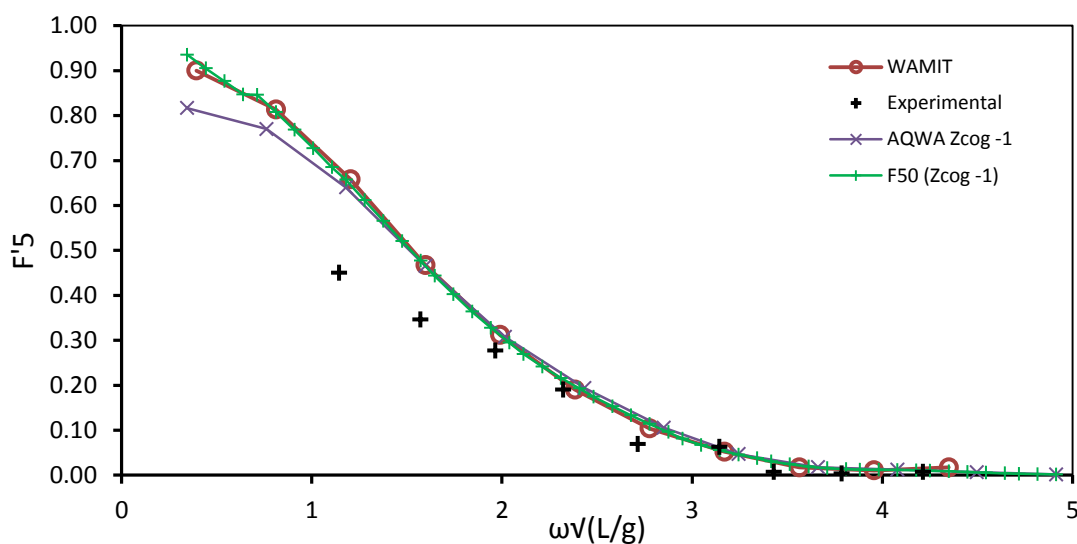


Figura 4.52 – Comparação entre consideração de doze e de cinquenta valores de frequência. Forças de Excitação. Modo de cabeceio.

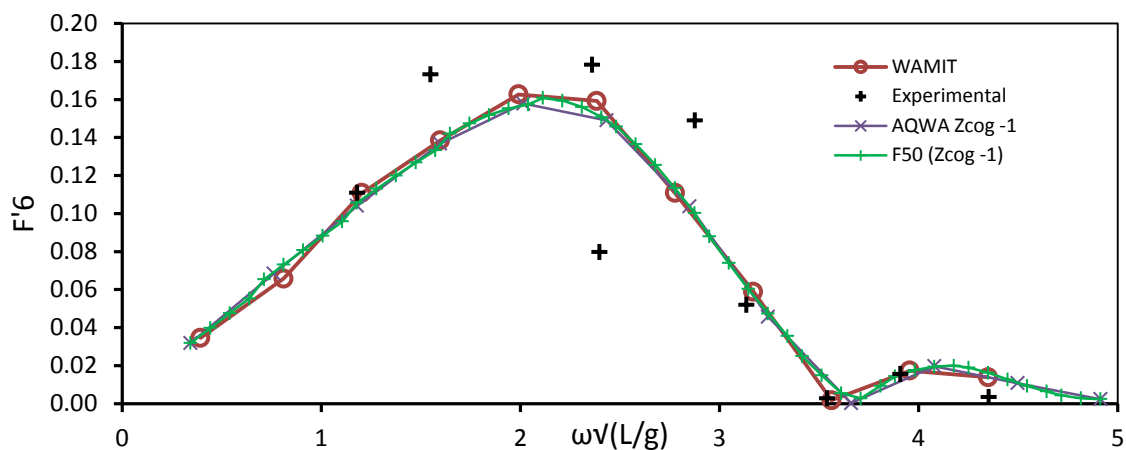


Figura 4.53 – Comparação entre consideração de doze e de cinquenta valores de frequência. Forças de Excitação. Modo de guinada.

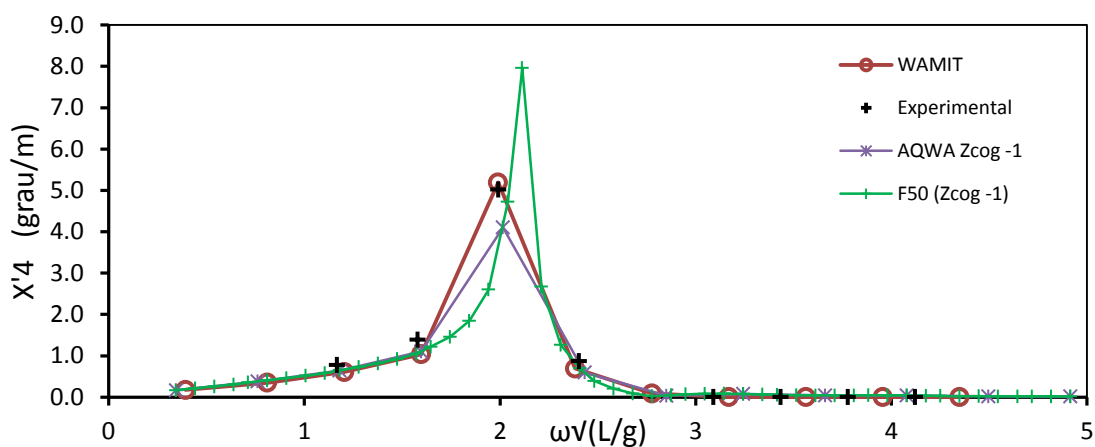


Figura 4.54 – Comparação entre consideração de doze e de cinquenta valores de frequência. Movimentos da barça livre. Modo de balanço.

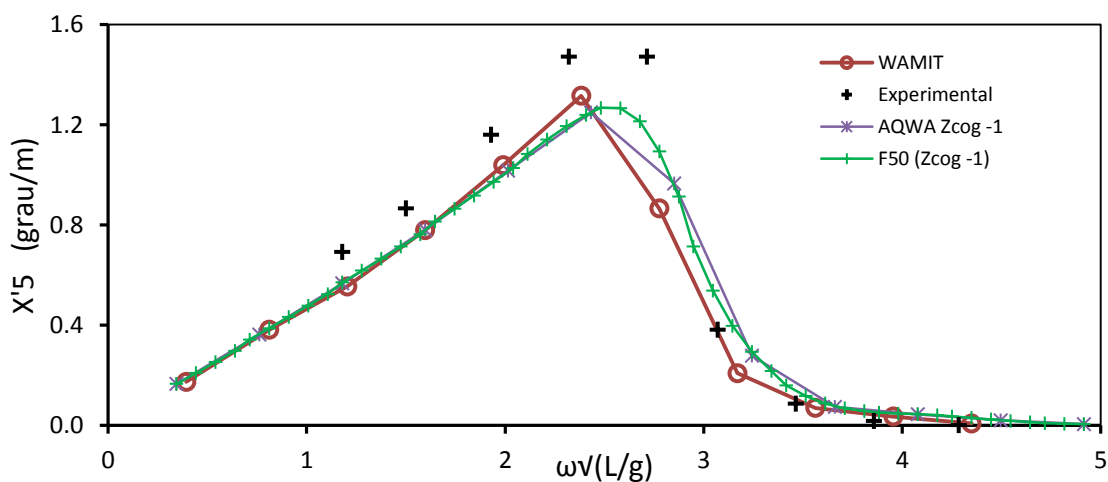


Figura 4.55 – Comparação entre consideração de doze e de cinquenta valores de frequência. Movimentos da barça livre. Modo de cabeceio.

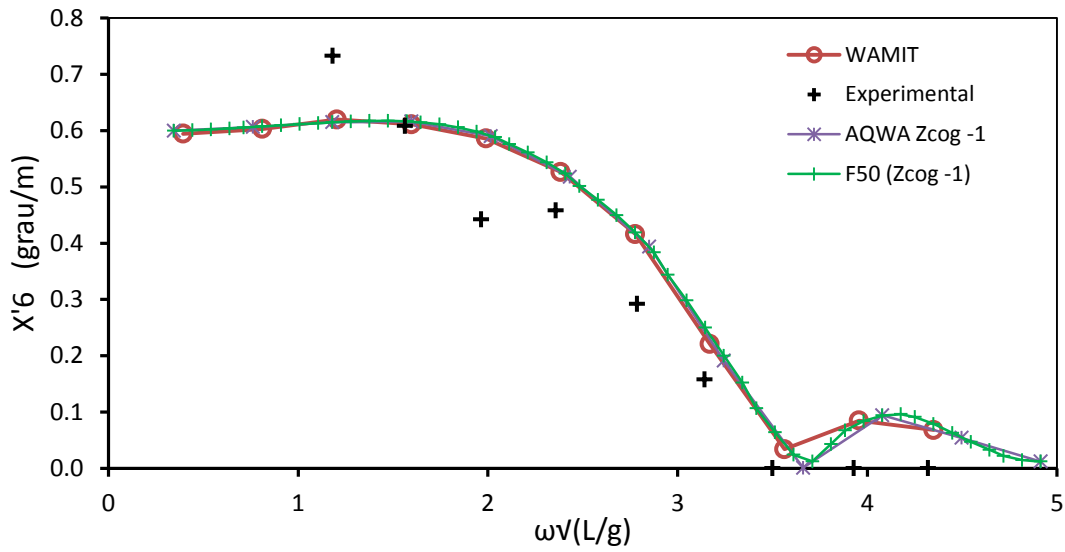


Figura 4.56 – Comparação entre consideração de doze e de cinquenta valores de frequência. Movimentos da barça livre. Modo de guinada.

Conforme se pode verificar pela análise das figuras anteriores, a consideração de um valor superior de frequências não resultou numa melhor concordância entre os resultados experimentais e os obtidos no modelo AQWA. Contudo, é possível constatar que a consideração de doze frequências é manifestamente insuficiente.

Tal como se pode observar na Figura (4.45), relativa aos movimentos da barça no modo de balanço, o aumento do número de frequências implicou uma alteração inequívoca, quer do valor máximo de oscilação, quer da frequência de pico. De facto, esta constatação não é de estranhar, uma vez que neste último teste foram calculados os movimentos para valores de frequência intermédios, que anteriormente não eram considerados, o que, consequentemente, implicava uma imprecisão na tradução dos resultados em gráficos lineares.

Tendo como objetivo confirmar os resultados obtidos numericamente para os movimentos oscilatórios no modo de balanço, calculou-se o valor esperado para frequência de pico (i.e., a frequência natural de oscilação do modo de balanço). Para tal e, sabendo que a frequência é o inverso do período, determinou-se, em primeiro lugar, o valor para o período natural (T_R) do modo de oscilação de balanço, expresso na equação (4.5).

$$T_R = \frac{2\pi}{\omega_R} = 2\pi \sqrt{\frac{Mi_x^2 + A_{44}}{W \overline{GM}_t}} = 2\pi \sqrt{\frac{i_x^2 + \frac{a_{44}}{M}}{g \overline{GM}_t}} \quad (4.5)$$

em que ω_R representa a frequência angular natural do modo de oscilação de balanço, W o peso da barça, M a massa do navio, a_{44} o momento de inércia adicionado para o modo de oscilação de balanço em fase com a aceleração angular do mesmo modo, i_x o raio de giração transversal e \overline{GM}_t a altura metacêntrica transversal.

Importa, ainda, referir que se desprezou a contribuição do amortecimento no cálculo do período natural, uma vez que, para ângulos de balanço pequenos, a contribuição desta parcela é residual quando comparada com os valores de W e M , sempre bastante elevados (Rosa Santos, 2010).

Considerando novamente que o centro de gravidade se encontrava a 1 m de profundidade, obteve-se, no AQWA, um valor para a altura metacêntrica de 17.243 m, naturalmente inferior ao valor obtido aquando da consideração do centro de gravidade a 5 m de profundidade.

Pela análise da equação (4.5), é possível antecipar que uma redução da altura metacêntrica implicará um aumento do período natural e, conseqüentemente, uma redução da frequência natural de oscilação. Prevendo que o valor para a frequência de pico se situava próximo do valor obtido para o movimento oscilatório máximo do modo de balanço, considerou-se este valor máximo ($7.959 \text{ }^\circ/\text{m}$) e a respetiva frequência (0.083 Hz). Desta forma, utilizou-se na equação (4.5) o valor de a_{44} correspondente à mesma frequência ($1.36 \times 10^{10} \text{ kg.m}^2/\text{rad}$). Assim, obteve-se um valor de 11.63 s para o período natural do modo de balanço, o que equivale a uma frequência de pico de 0.086 Hz, sendo o seu valor convertido para comparação com os resultados anteriores igual a 2.113.

A Figura (4.57) apresenta o resultado obtido para a frequência de pico do modo de oscilação de balanço.

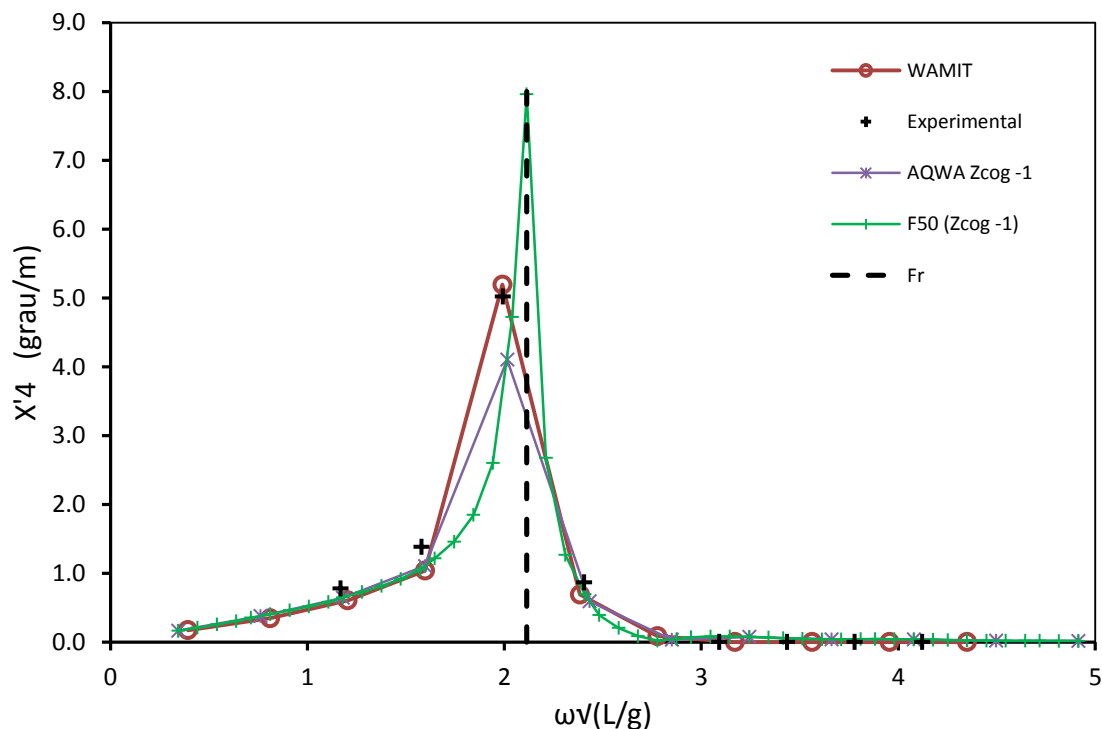


Figura 4.57 – Representação da frequência de pico para o modo de oscilação de balanço.

Conforme se pode verificar na Figura (4.48), a concordância entre o valor determinado para a frequência de pico e os resultados obtidos para os movimentos oscilatórios no modo de balanço, é extremamente satisfatória, o que valida os resultados do modelo AQWA.

4.3.4.8 Análise no domínio do tempo

Tendo como objetivo dar continuidade ao estudo da barça e melhorar os conhecimentos sobre o funcionamento do AQWA, foi efetuada uma análise no domínio do tempo, procurando quantificar os movimentos da barça segundo os seus seis graus de liberdade.

O AQWA possibilita duas simulações distintas no domínio do tempo: considerando condições normais do ambiente marítimo (*AQWA-Drift*) ou contemplando condições marítimas severas (*AQWA-Naut*).

No que diz respeito à análise dos movimentos de um corpo no domínio do tempo, o AQWA permite obter quatro formas de resultados distintos: movimentos para o conjunto de altas e baixas frequências (*Actual Response*), movimentos para baixas frequências (*Low Frequency*), movimentos para a frequência da onda (*Wave Frequency*) e movimentos baseados nos RAO (*Response Amplitude Operator*).

A opção *Low Frequency* permite filtrar os resultados obtidos na opção *Actual Response*, reduzindo a amplitude dos resultados a uma “frequência de corte” (ω_{cutoff}), correspondente a um terço do décimo da linha espectral mais um, ou seja, para um espectro com N linhas espectrais, $\omega_{cutoff} = \omega_n/3$, em que $n = 0.1N + 1$. Por seu lado, a opção *Wave Frequency* permite extrair os resultados correspondentes ao intervalo de frequência que “sobra” depois da aplicação do filtro anteriormente descrito aos resultados obtidos na opção *Actual Response*. Por fim, como o próprio nome indica, os movimentos obtidos através dos RAO remetem apenas para a utilização destes, não contabilizando os efeitos das conexões existentes, a não ser que estas sejam introduzidas posteriormente numa matriz adicional.

Foram realizados três testes, considerando agitação regular e irregular. Para todos manteve-se a barça livre, sendo a direção da onda incidente de 135° , conforme é considerada nos trabalhos anteriores, para uma análise no domínio da frequência. A agitação regular foi definida com base na teoria linear, enquanto as ondas irregulares foram definidas através de um espectro de *Pierson-Moskowitz*. Atendendo aos resultados obtidos anteriormente, decidiu-se manter o centro de gravidade a uma profundidade de 1 m. O Quadro (4.5) apresenta as condições de testes consideradas.

Quadro 4.5 – Condições de testes para análise no domínio do tempo.

Tipo de Agitação	Altura de Onda H (m)	Altura de Onda Significativa H _s (m)	Período de Onda T (s)	Período de Onda de Pico T _p (s)
Regular	2	-	10	-
Irregular	-	2	-	10
	-	4	-	12

A Figura (4.58) apresenta os resultados obtidos para agitação regular, na opção *Actual Response*.

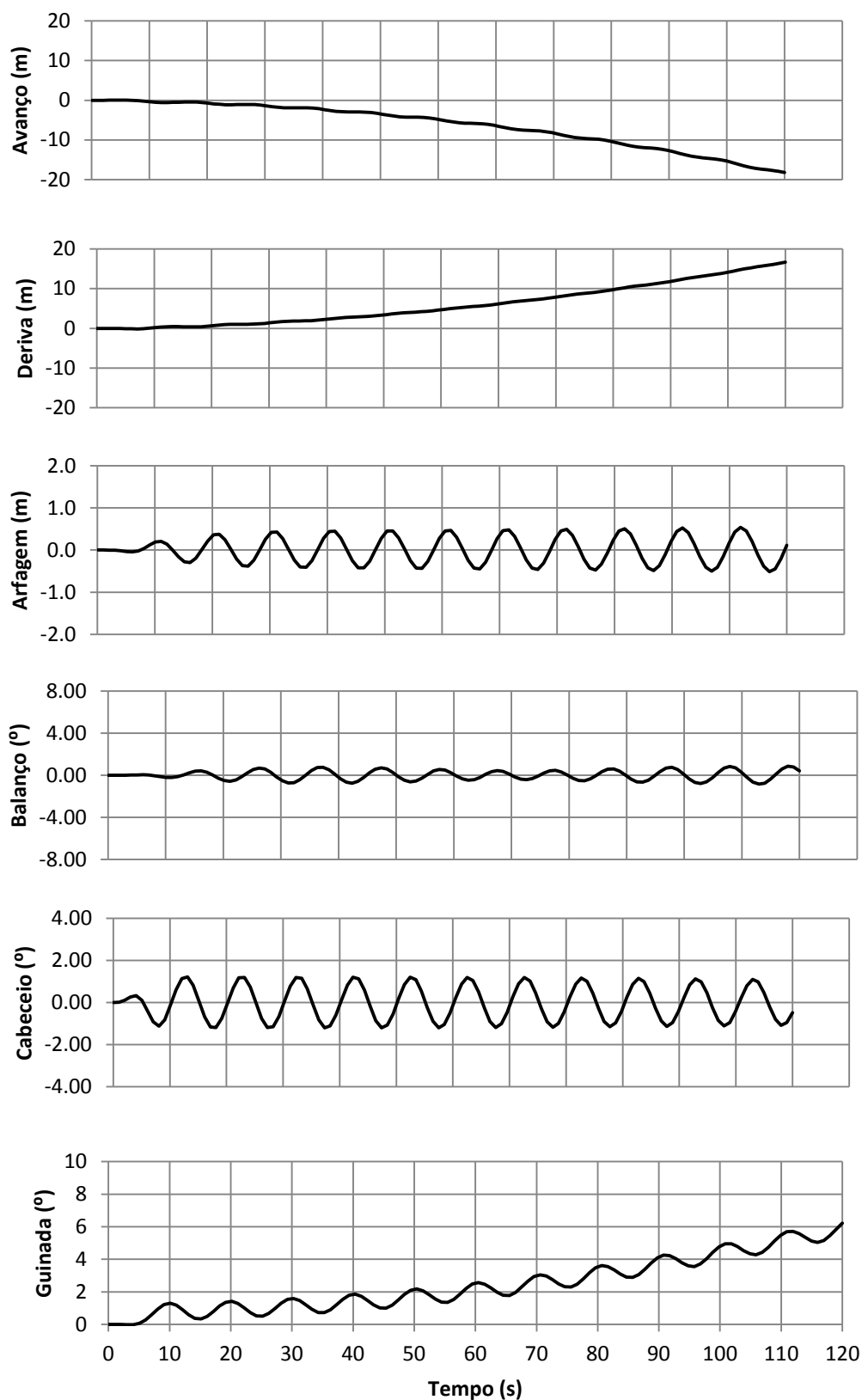


Figura 4.58 – Trecho da série temporal dos movimentos da barça.
Direção de onda incidente = 135 °. Agitação regular. $H = 2$ m; $T = 10$ s.

Para os movimentos sinusoidais, comparou-se os valores máximos absolutos obtidos na análise no domínio do tempo, com os valores para o mesmo período (10 s), na análise no domínio da frequência, de modo a confirmar a inexistência de qualquer anormalidade. O Quadro (4.6) apresenta os resultados obtidos.

Quadro 4.6 – Comparação entre os valores obtidos no domínio da frequência e no domínio do tempo, para os modos de arfagem, balanço e cabeceio.

Modo de Oscilação	Domínio da frequência Movimento oscilatório para T = 10 s	Domínio do tempo Movimento oscilatório máximo para T = 10 s
Arfagem	0.462 m	0.535 m
Balanço	0.493 °	0.857 °
Cabeceio	1.215°	1.220 °

Conforme se pode verificar, os resultados encontram-se em perfeita concordância, dentro dos intervalos esperados.

Para além desta consideração e, tendo como objetivo validar o número de cinquenta frequências testadas em (4.3.4.7), analisaram-se os movimentos oscilatórios para os três modos anteriores, no domínio do tempo, para a frequência máxima em cada modo, determinada no domínio da frequência. O Quadro (4.7) apresenta os resultados obtidos.

Quadro 4.7 – Comparação entre os valores obtidos no domínio da frequência e no domínio do tempo, para a frequência máxima, para os modos de arfagem, balanço e cabeceio.

Modo de Oscilação	Frequência Máxima (Hz)	Domínio da frequência Movimento oscilatório para frequência máxima	Domínio do tempo Movimento oscilatório máximo para a frequência máxima
Arfagem	0.014	0.992 m	0.994 m
Balanço	0.086	8.000 °	9.257 °
Cabeceio	0.101	1.220 °	1.220 °

Mais uma vez, a concordância é total, com os resultados a enquadrarem-se dentro dos valores previstos, o que valida a série temporal simulada.

Para além dos testes considerando agitação regular, foram realizados mais dois testes, tal como foi referido anteriormente, considerando agitação irregular. As Figuras (4.59) e (4.60) apresentam os resultados obtidos.

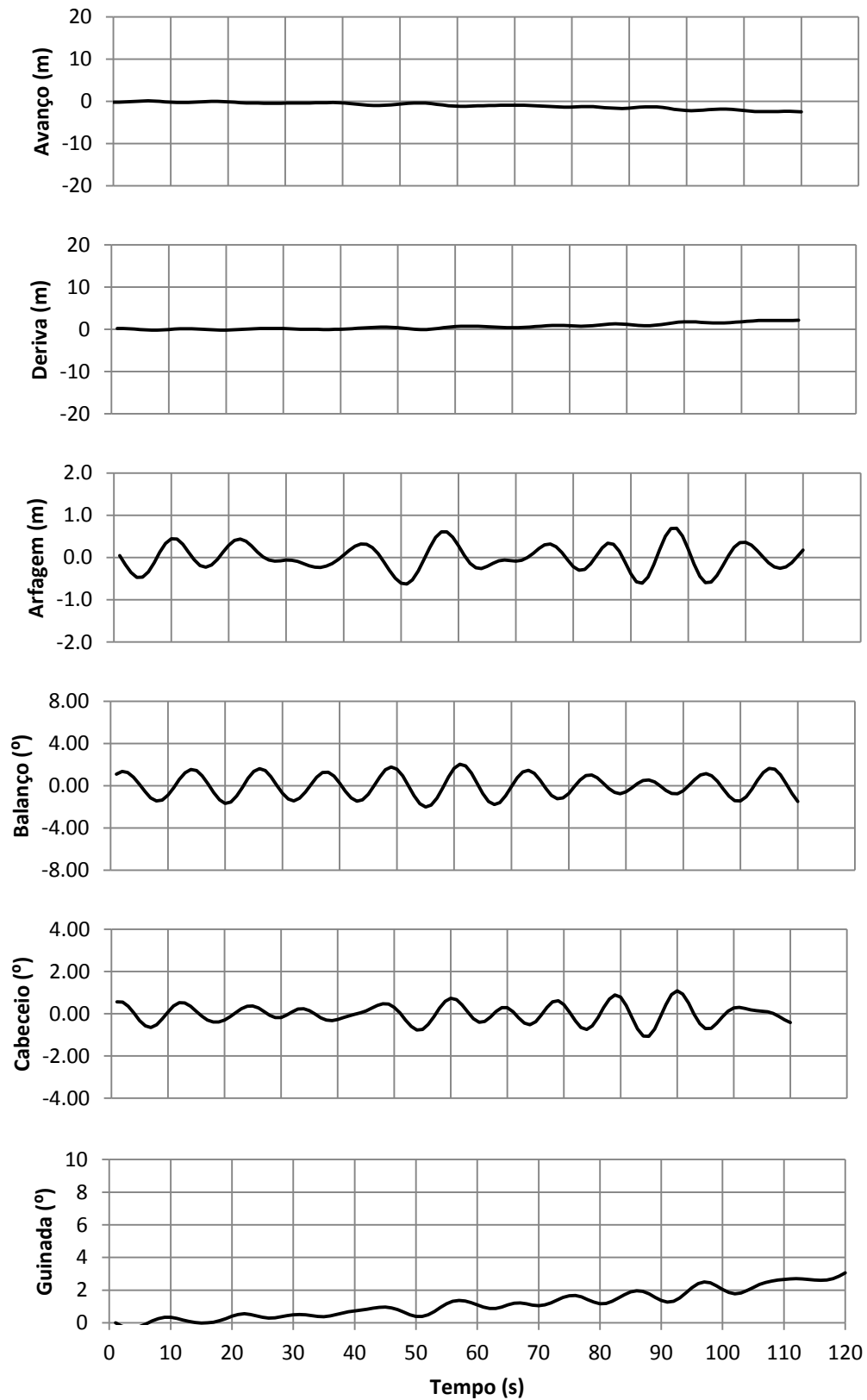


Figura 4.59 – Trecho da série temporal dos movimentos da barça.
Direção de onda incidente = 135°. Agitação Irregular. $H_S = 2$ m; $T_P = 10$ s.

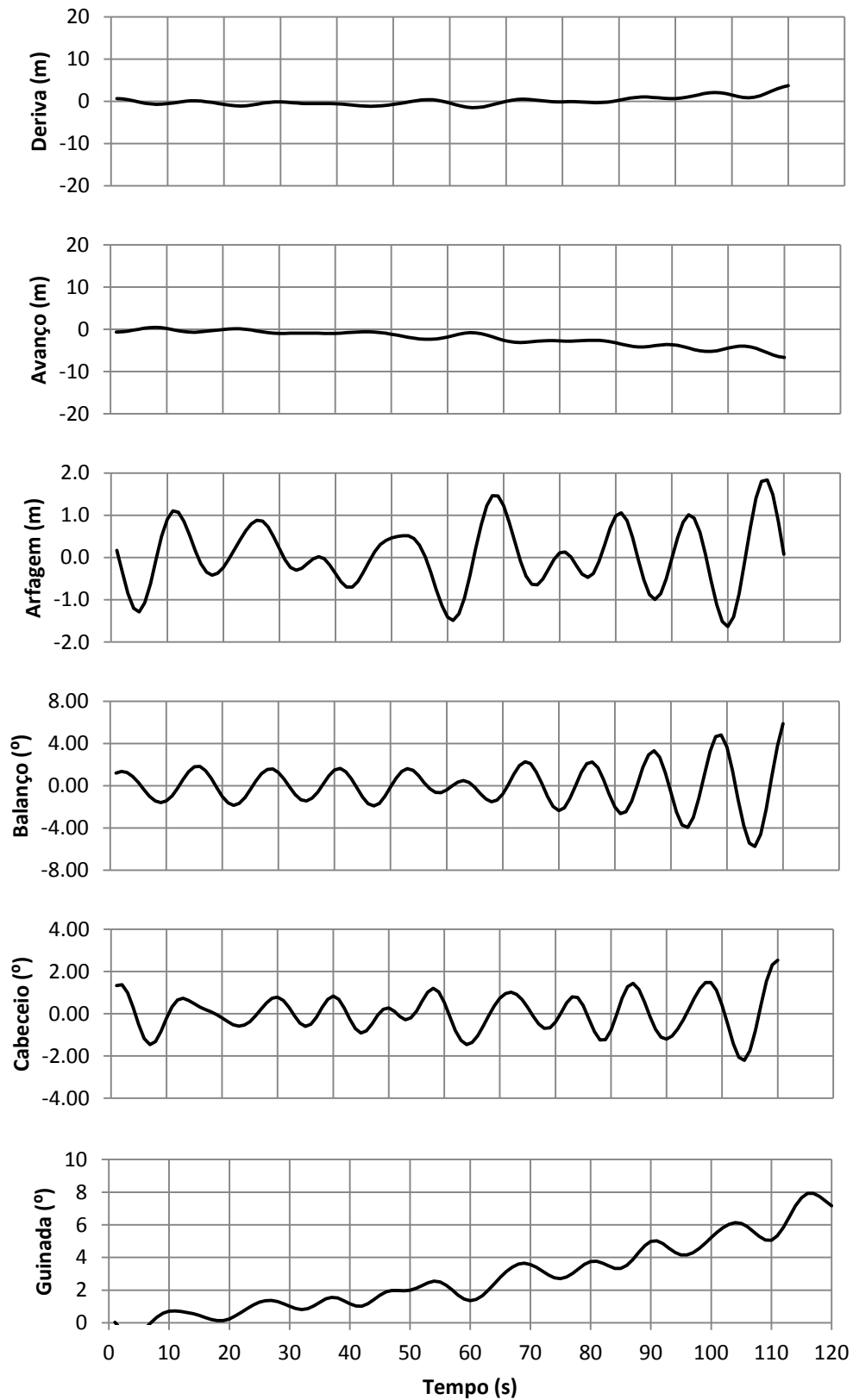


Figura 4.60 – Trecho da série temporal dos movimentos da barça.
Direção de onda incidente = 135 °. Agitação Irregular. $H_S = 4$ m; $T_P = 12$ s.

5

MODELAÇÃO NUMÉRICA DO CECO

5.1 INTRODUÇÃO

Sabendo que o estudo e o desenvolvimento de um dispositivo conversor da energia das ondas assenta na natureza das solicitações a que está sujeito e, depois de validada a aplicação do modelo numérico aos casos de estudo preliminares, importa agora passar para a simulação do dispositivo CECO, propriamente dita.

A simulação do dispositivo compreende três partes fundamentais: primeiro, a construção geométrica de determinados componentes e das suas ligações; depois, a geração da interação entre o tirante superior e o corpo central fixo, nomeadamente a criação do movimento de translação entre ambos; e, por fim, a calibração do modelo numérico. O primeiro passo implica desenhar os módulos laterais móveis, o ligador superior, o elemento estrutural anelar e os três tirantes, de acordo com as dimensões no protótipo, bem como o modo como estes componentes se interligam. Posteriormente, foi criado o corpo central fixo, procurando definir-se a interação entre este e o tirante superior. A calibração do modelo numérico é realizada recorrendo aos resultados obtidos em modelo físico, na última etapa de testes, realizada por Marinheiro (2013).

Apesar de, em teoria, a construção dos diferentes componentes do CECO não apresentar um grau de complexidade muito elevado, o mesmo não se pode dizer do modo de simulação do movimento de translação entre as partes móveis (flutuadores, estrutura anelar, ligador superior e tirantes) e o corpo central fixo, uma vez que o AQWA impõe algumas restrições na geração de um movimento de translação puro. Importa ainda referir que esse movimento relativo ocorre apenas segundo um grau liberdade e está condicionado pelas forças de atrito que possam existir nessa "ligação", mas também pelas forças de amortecimento que resultam do funcionamento do sistema de extração de energia (PTO).

5.2 COMPONENTES SIMULADOS

5.2.1 INTRODUÇÃO

Conforme foi referido anteriormente, a presente dissertação abordou a modelação numérica dos seguintes componentes:

- Módulos laterais móveis;
- Ligador superior;
- Tirantes;
- Elementos anelar estrutural;
- Corpo central fixo.

5.2.2 Módulos laterais móveis e ligador superior

A geometria dos MLM's foi definida a partir das dimensões consideradas na segunda fase do estudo em modelo físico, considerando que cada um desses elementos tinha uma altura de 8 m e uma largura de 4.5 m. A distância entre os dois MLM's é de 6 m, de forma a garantir que não há problemas na criação do corpo central fixo, cujo diâmetro é de 4 m, situado entre ambos os módulos laterais móveis. Inicialmente considerou-se que o grau de submersão (G_s) dos MLM's era de 60%. A Figura (5.1) apresenta um esquema dos MLM's e as respetivas dimensões.

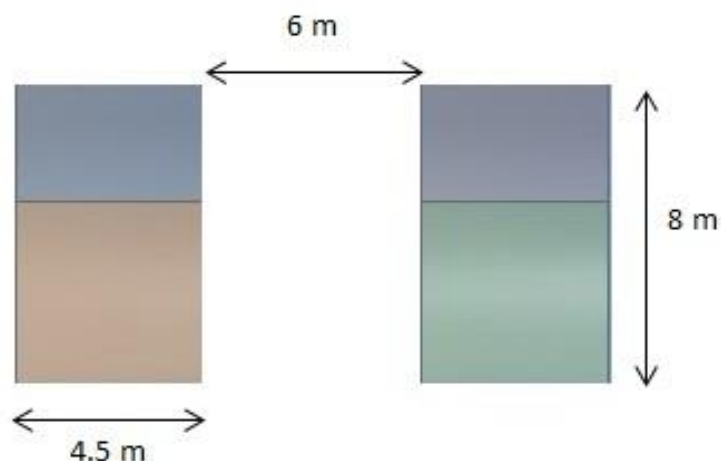


Figura 5.1 – Dimensões dos MLM's

No que diz respeito à malha criada para uma análise isolada dos MLM's, esta foi construída com a opção *Basic Meshing*, para uma dimensão máxima de elementos igual a 1.0 m e uma *defeaturing tolerance* de 0.5 m. Estas definições resultaram numa malha com 972 elementos para o conjunto dos dois MLM's (Figura 5.2).

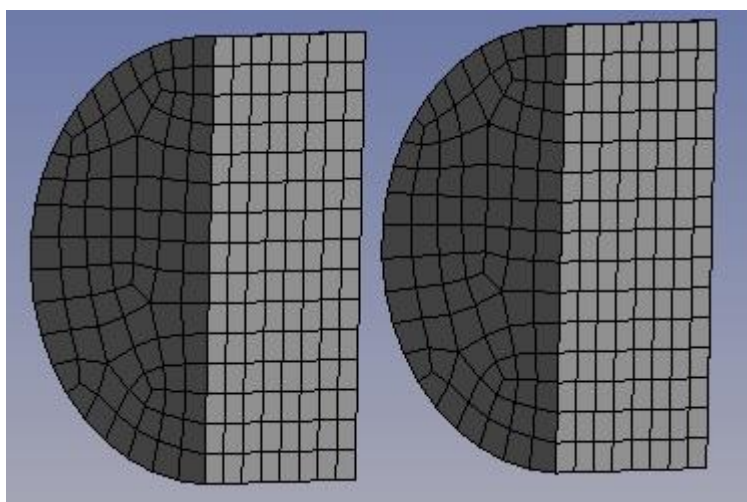


Figura 5.2 – Malha dos MLM's

Tal como se pode observar nas Figuras (5.3) e (5.4), o ligador superior foi criado como um elemento linear (*line body*), com uma secção transversal quadrada, com 20 cm de lado e 3 cm de espessura, conforme é descrito no trabalho de Marinheiro (2013).

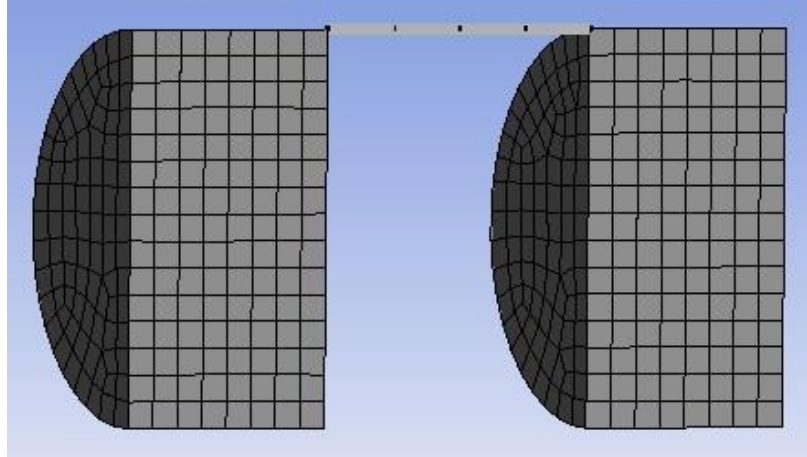


Figura 5.3 – Ligação rígida entre os dois MLM's, através do elemento linear

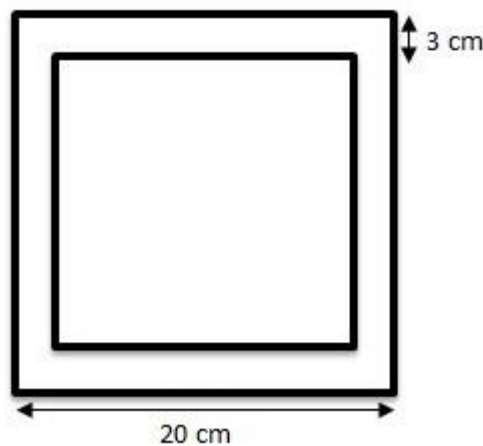


Figura 5.4 – Secção transversal do ligante superior

5.2.3 Elemento anelar estrutural

Para além de ligar os tirantes e os módulos laterais móveis, o elemento anelar estrutural tem ainda a função de assegurar a estabilidade do conjunto. Apesar de, segundo o registo de patente, o CECO dispor de uma estrutura anelar com três anéis, Marinheiro (2013) optou pela construção de apenas dois níveis (superior e inferior), uma vez que apenas foram instalados três tirantes centrais, em vez dos quatro previstos inicialmente. Esta estrutura anelar foi reproduzida por elementos lineares (TUBE), com 32 cm de diâmetro, sendo a largura igual a 5.60 m. Para ligar cada um dos anéis e conferir à estrutura maior rigidez, colocaram-se elementos transversais, com a mesma secção e o mesmo material, que funcionam como contraventamentos (Marinheiro, 2013).

A geometria considerada na modelação numérica para este elemento anelar foi ligeiramente diferente da geometria definida na modelação física. Com efeito, Marinheiro (2013) considerou um espaçamento regular de 20 cm entre cada elemento transversal, o que equivale a 4 m no protótipo. No entanto, apesar de se ter mantido o comprimento de 24 m definido para os tirantes e para a estrutura anelar, o espaçamento considerado entre cada elemento transversal foi ligeiramente diferente. Esta alteração foi necessária devido à condicionante imposta pelo modelo, no que diz respeito à ligação do elemento estrutural aos módulos laterais móveis. De facto, na modelação física, esta ligação foi efectuada através de duas placas de ferro, que fazem a solidarização dos MLM's com a estrutura anelar e os tirantes (Marinheiro, 2013). A Figura (5.5) apresenta o elemento anelar estrutural considerado na modelação física.



Figura 5.5 – Elemento anelar estrutural considerado na modelação física (adaptado de Marinheiro, 2013)

No entanto, no AQWA, essa ligação foi realizada através de juntas rígidas, que impedem movimentos entre estes componentes, sendo necessário criar pontos de contacto. Desta forma, mantendo o espaçamento de 4 m entre cada elemento transversal e, tendo em conta que os pontos de contactos serão os correspondentes a pontos de intersecção entre os elementos verticais e os elementos horizontais, apenas seria possível gerar dois pontos de ligação em cada MLM. Por motivos de estabilidade, entendeu-se que seria vantajoso a criação de quatro pontos de contacto em cada flutuador, o que obrigou a considerar um espaçamento de 2 m entre cada elemento transversal, mas apenas entre os dois módulos laterais móveis.

As Figuras (5.6) e (5.7) apresentam o elemento anelar estrutural construído no modelo AQWA.

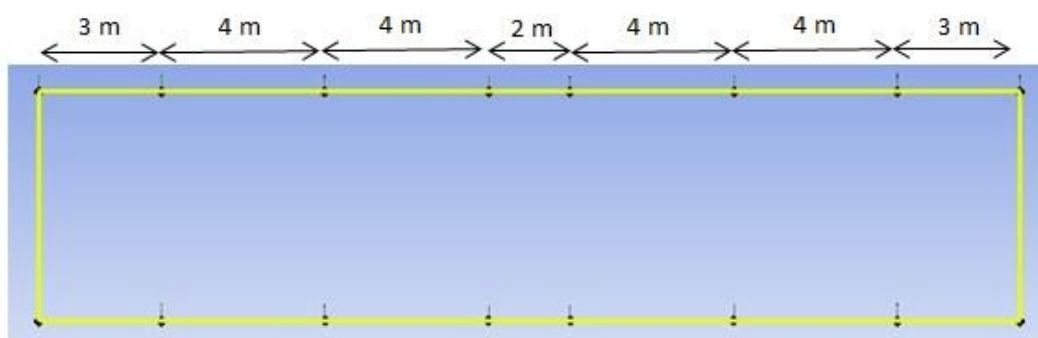


Figura 5.6 – Projecção vertical e dimensões do elemento anelar estrutural

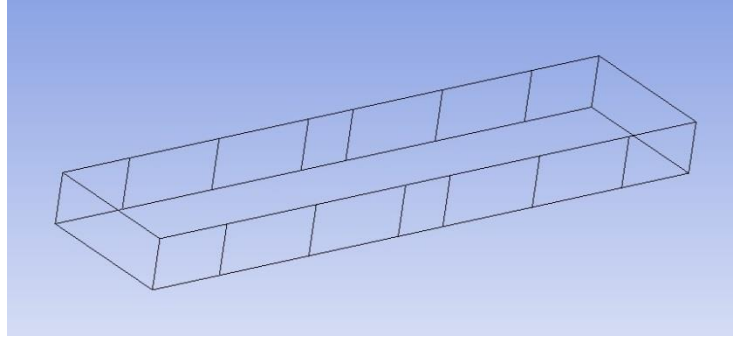


Figura 5.7 – Elemento anelar estrutural construído no Design Modeler

Relativamente à malha criada para o conjunto dos módulos laterais móveis com o ligador superior e o elemento estrutural, mantiveram-se as opções definidas na geração da malha isolada para os MLM's, tendo-se obtido um número total de 1033 elementos. A Figura (5.8) apresenta o conjunto com a malha efetuada, sendo possível observar o modo como o AQWA realiza a malha para elementos lineares.

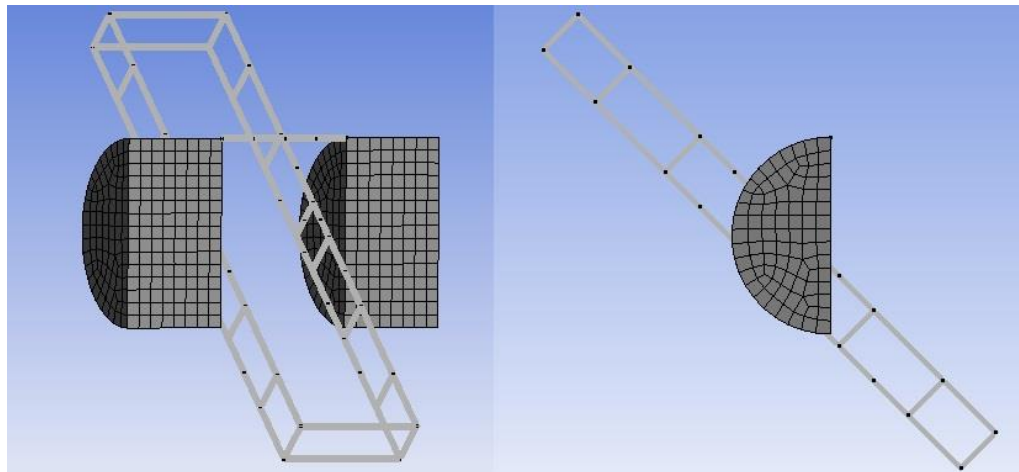


Figura 5.8 – Ligação entre o elemento anelar estrutural e os módulos laterais móveis, para uma inclinação do dispositivo de 45°

5.2.4 Tirantes

Relativamente aos tirantes, importa referir que o tirante central se destina a fazer movimentar, em posição oblíqua, o mecanismo cremalheira-engrenagem, que aciona o sistema de extração de energia (PTO) instalado no interior do corpo central fixo, enquanto os dois tirantes laterais, também em posição oblíqua, apresentam uma função orientadora e estabilizadora do movimento através de calhas (Marinheiro, 2013).

Os três tirantes foram representados, no AQWA, por elementos lineares. No entanto, o software não permite a interseção de vários elementos lineares com secções transversais diferentes. Este facto merece destaque, uma vez que, apesar de os tirantes laterais, em modelação física, terem sido construídos com a mesma secção transversal que o elemento anelar estrutural, o mesmo não se pode afirmar do tirante superior. Com efeito, na modelação física, este foi definido com uma secção transversal quadrada, com 10 mm de lado, o que equivale a 20 cm no protótipo. Contudo, na

modelação numérica, no AQWA, este foi definido com a mesma secção transversal dos tirantes laterais e do elemento estrutural, através de um elemento tubular com 32 cm de diâmetro.

As Figuras (5.9) a (5.11) apresentam a solidarização dos tirantes com o elemento estrutural e, construídos no *Design Modeler*.

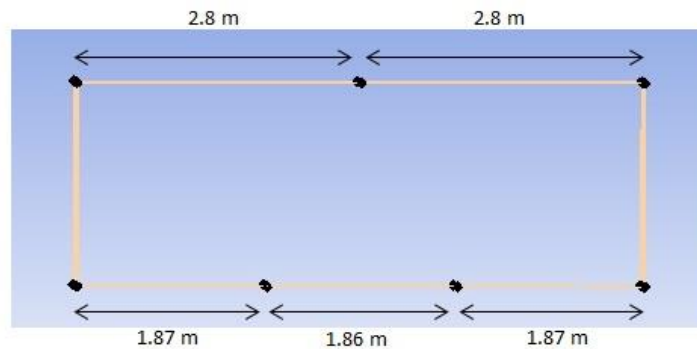


Figura 5.9 – Distâncias entre os tirantes e o elemento estrutural. Vista frontal

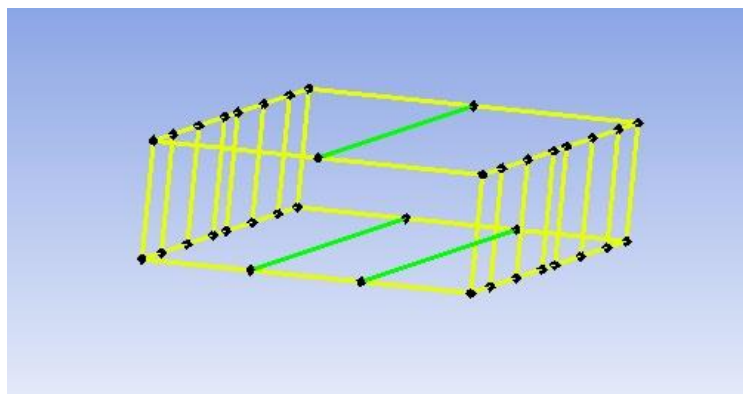


Figura 5.10 – Solidarização dos tirantes com o elemento anelar estrutural

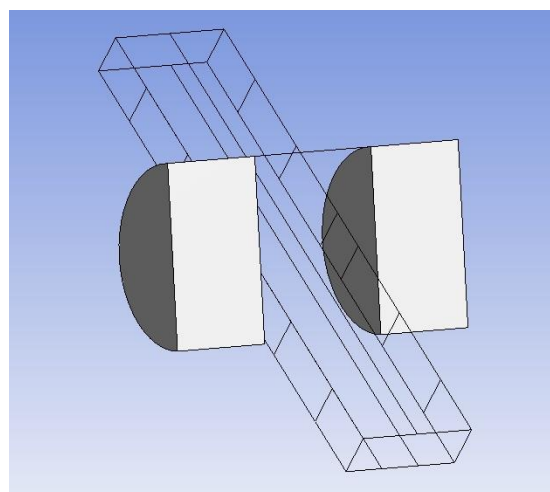


Figura 5.11 - Ligação entre o elemento anelar estrutural, os tirantes e os módulos laterais móveis, para uma inclinação de 45°

5.2.5 Corpo central fixo

O corpo central fixo foi criado através de um elemento cilíndrico, com 4 m de diâmetro e 12 m de altura, uma vez que as suas dimensões não se encontram definidas no registo de patente do CECO. O local de passagem dos tirantes foi “removido”, de forma a possibilitar a livre passagem destes através do corpo central. No entanto, esta consideração geométrica não define ainda o modo de interação entre estes elementos, nomeadamente o movimento de translação experimentado pelos tirantes.

Para a criação da malha do corpo central fixo, mantiveram-se, mais uma vez, as definições utilizadas anteriormente, o que conduziu à geração de uma malha com 739 elementos, apenas para o corpo central (Figura 5.12).

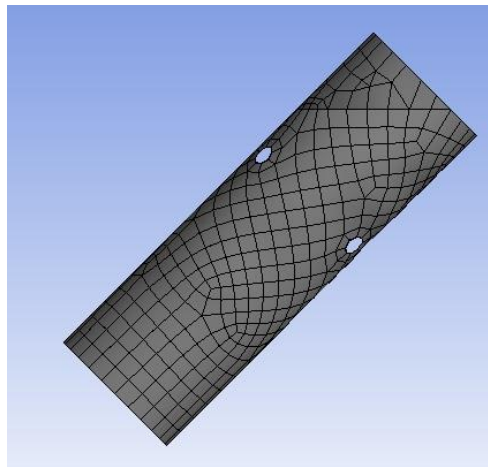


Figura 5.12 – Malha criada para o corpo central fixo. Inclinação de 45°

Assim, torna-se possível criar a malha do conjunto global do dispositivo, com as partes móveis (flutuadores, ligador superior, elemento anelar estrutural e tirantes) e o corpo central fixo, sendo que o número de elementos gerados foi de 1778 (Figuras 5.13 e 5.14).

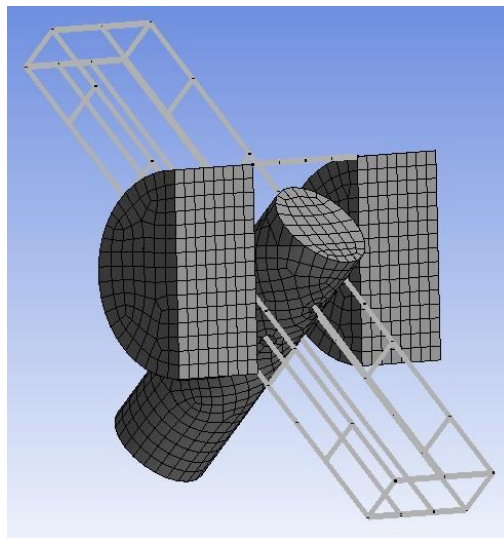


Figura 5.13 – Componentes do CECO construídas no *Design Modeler*

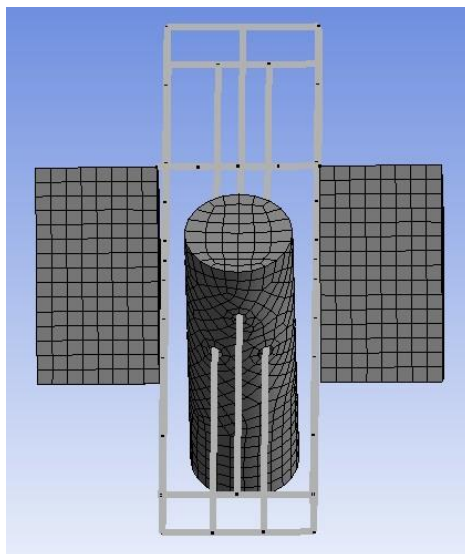


Figura 5.14 – Vista frontal do CECO, com a respetiva malha

No que diz respeito ao sistema de fixação do corpo central, o AQWA permite considerar esta estrutura fixa, através da opção “*structure is fixed in place*”, juntamente com a consideração de pontos de conexão no próprio corpo e de pontos fixos. Estes últimos podem estar definidos no fundo do oceano, sendo necessário definir o sistema de amarração, ou ainda, ficticiamente, num qualquer ponto do próprio corpo, coincidindo com os pontos de conexão definidos. Por uma questão de simplicidade, procurando evitar as implicações introduzidas por um sistema de amarração, optou-se pela segunda forma de fixação.

O tipo de fixação escolhido está também de acordo com a forma como o dispositivo CECO foi simulado nas duas fases do estudo experimental, possibilitando assim a utilização dos resultados experimentais na calibração do modelo numérico. Importa ainda frisar que esse tipo de fixação corresponde a uma instalação do CECO acoplado a estruturas rígidas fixas, designadamente quebra-mares, pilares cravados no fundo do oceano, ou mesmo pilares de torres eólicas *offshore*. A utilização de estruturas pré-existentes como elemento de suporte permite reduzir os custos de instalação, com claras repercussões ao nível da rentabilidade do investimento. Por outro lado, e a título de exemplo, a utilização do dispositivo em conjunto com torres eólicas *offshore* permite, para além da redução dos custos de instalação, a partilha do mesmo espaço físico, uma produção de energia mais constante, redução dos custos de manutenção e utilização da mesma ligação à rede elétrica, entre outras sinergias.

5.3 REPRODUÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE O CORPO CENTRAL FIXO E OS TIRANTES

Depois de definida a geometria dos diversos componentes constituintes do CECO, bem como a ligação entre os módulos laterais móveis, o elemento anelar estrutural e os tirantes, a segunda parte do modelação contempla, conforme foi referido anteriormente, a reprodução do movimento de translação dos tirantes, através do corpo central fixo. Esta definição é indispensável para a simulação do comportamento do dispositivo perante diferentes solicitações de agitação marítima.

Atendendo a que o modo de criação desta interação entre corpos não se encontra descrito em nenhum dos manuais ou tutoriais disponibilizados pela ANSYS, foi necessário encontrar uma forma alternativa

de contornar o problema. De facto, o modelo AQWA não permite a definição de um movimento de translação simples, pelo que este obstáculo foi ultrapassado recorrendo à definição de um movimento de rotação, cuja explicação será dada mais à frente.

Em primeiro lugar foi necessário fixar o corpo central, através de pontos de amarração fixos à superfície livre, conforme foi referido anteriormente, em (5.2.5). Assim definiram-se quatro pontos de conexão no corpo central, coincidentes com quatro pontos fixos, definidos na superfície livre, sendo unidos através de quatro juntas rígidas (*rigid joints*), Figura (5.15).

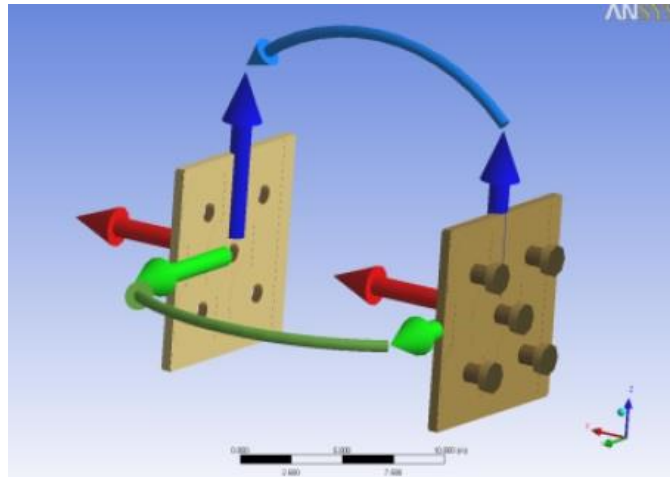


Figura 5.15 – Esquema ilustrativo de uma *Rigid joint* (adaptado de Ansys, 2012b)

Importa, neste ponto, explicar que uma *rigid joint* impede qualquer rotação sobre os três eixos definidos, transmitindo assim um momento sobre cada um destes (Ansys, 2012b).

Esta definição permitiu alcançar o objetivo proposto, tendo-se fixado com sucesso o corpo central.

Posteriormente, foi então definida a interação entre o corpo central fixo e as partes móveis. Tal como já foi referido, recorreu-se a uma forma alternativa de reproduzir o movimento de translação, através de uma forma utilizada ocasionalmente no modelo AQWA. Assim, definiu-se um movimento de rotação com um raio suficientemente grande (1000 m), para que, num intervalo de análise curto, o mesmo movimento seja praticamente coincidente com um movimento de translação (Figura 5.16).

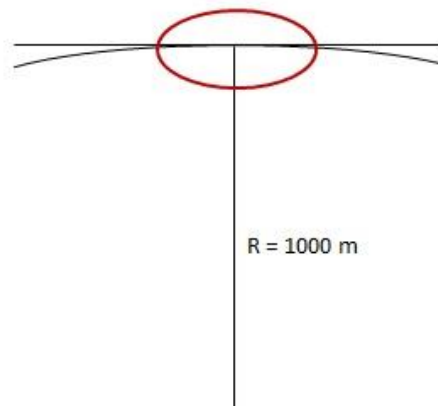


Figura 5.16 – Esquema ilustrativo do movimento de rotação criado, para reproduzir o movimento de translação

Com efeito, somando o comprimento dos tirantes centrais (24 m) com a máxima amplitude do movimento obtida no estudo em modelo físico (aproximadamente 7.5 m), no caso em que não se considera o amortecimento introduzido pelo PTO, facilmente se constata que o valor final (cerca de 31.5 m) é claramente inferior ao raio do movimento definido, situando-se o seu rácio aproximadamente na ordem de um para trinta (1/30). Esta consideração valida a hipótese anterior, que considera que, perante estas condições, o movimento de translação pode ser eficazmente reproduzido através da definição de um movimento de rotação.

A criação deste movimento de rotação foi possível através da definição de uma junta articulada (*hinged joint*, Figura 5.17) entre o corpo central fixo e os tirantes. Este tipo de juntas permite a rotação apenas sobre um dos eixos considerados, transmitindo um momento sobre os outros dois.

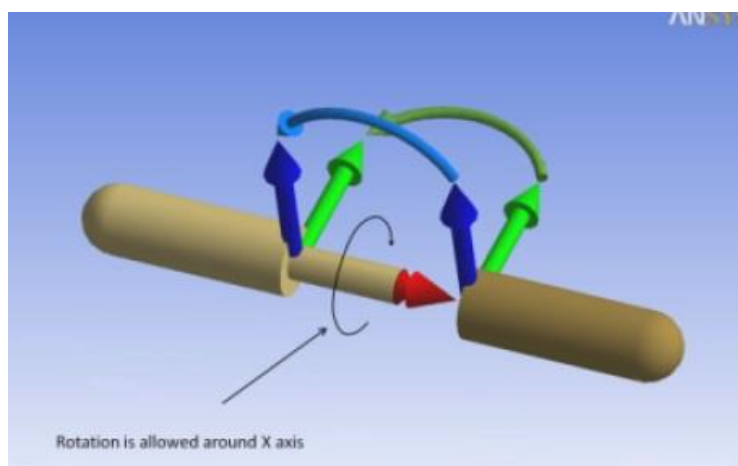


Figura 5.17 – Esquema ilustrativo de uma *Hinged joint* (adaptado de Ansys, 2012b)

Tendo como objetivo clarificar a compreensão das Figuras (5.15) e (5.17), é de referir que, em ambas, as juntas são representadas com as suas extremidades separadas. No entanto, aquando da sua criação no modelo (*Model*), é preciso definir os pontos aos quais as suas extremidades serão unidas, sendo que uma junta pode unir duas estruturas, através de um ponto de conexão em cada, ou uma estrutura e um ponto fixo.

Importa ainda explicar a razão de ter sido criada apenas uma junta para reproduzir o movimento desejado, e não três, uma para cada tirante. Com efeito e, conforme foi referido anteriormente em (4.3.3.1), os elementos lineares não podem ser criados isoladamente, dissociados de estruturas sólidas, pelo que os tirantes, o ligador superior e o elemento anelar estrutural fazem parte, juntamente com os módulos laterais móveis, do mesmo conjunto (*part*). Atendendo a que no modelo, qualquer conexão apenas pode ser criada entre dois conjuntos (*parts*), e não entre elementos dentro do mesmo conjunto (*part*), a junta articulada foi definida entre o conjunto das partes móveis e o corpo central fixo. Desta forma e, considerando que a interação das partes móveis com o corpo central fixo é feita através dos tirantes, pode-se afirmar que o atrito e o amortecimento introduzidos se encontram igualmente distribuídos pelos três tirantes. Este pormenor da construção em modelo numérico difere do que foi considerado no estudo em modelo físico, onde a resistência associada ao atrito se encontra presente nos três tirantes, mas o amortecimento introduzido pelo PTO apenas ocorre no tirante superior.

Foi ainda necessário, para garantir que o movimento das partes móveis ocorre ao longo da direção pretendida, efetuar uma rotação do referencial local nesta junta, colocando-o de acordo com a inclinação definida para cada teste.

5.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A etapa seguinte da modelação numérica do dispositivo CECO consistiu na calibração do modelo numérico criado, através do recurso aos resultados obtidos na última fase de testes da modelação física, por Marinheiro (2013). Para esse efeito, foram selecionados quatro testes representativos, considerando-se em todos agitação regular, um grau de submersão de 60% e uma inclinação de 45°. No que concerne ao nível de amortecimento introduzido pelo PTO, foram consideradas as seguintes situações:

- Sem amortecimento;
- Com amortecimento (resistência externa = 100 Ohms);
- Com amortecimento (resistência externa = 10 Ohms);
- Com amortecimento (resistência externa = 1 Ohm).

Uma vez que o primeiro teste foi realizado antes da instalação do sistema de extração de energia - PTO, os resultados experimentais apenas refletem o efeito do atrito existente no sistema de guiamento dos tirantes centrais. Nos outros três testes, já com o PTO em funcionamento, os resultados traduzem o efeito, quer do atrito referido anteriormente, quer do amortecimento introduzido pelo PTO, associado à extração de energia. Cada um desses testes foi realizado para um grau de amortecimento diferente, simulado utilizando resistências externas, responsáveis pela dissipação da energia elétrica produzida pelo CECO durante o teste experimental.

Relativamente ao modelo numérico, tanto o atrito como os diferentes graus de amortecimento são ajustados nas definições da junta articulada anteriormente criada. O atrito é definido através da opção *Constant Friction*, enquanto o amortecimento é definido segundo qualquer uma das três direções associadas aos três eixos do referencial global, sendo possível gerar diferentes graus de amortecimento nas três direções, independentes uns dos outros. Isto implica que, no presente estudo, para se criar o amortecimento na direção do movimento, oblíqua, terá de ser introduzido amortecimento segundo as componentes x e z.

No que diz respeito aos resultados, o modelo AQWA apresenta os valores finais segundo o referencial global, tornando-se então necessário converter os valores para o referencial local da junta, de maneira a que se obtenha o movimento segundo a direção oblíqua pretendida. Assim e, tendo em conta que se considerou uma inclinação de 45° para o dispositivo, os valores segundo a componente x e z são iguais, sendo que a multiplicação dos resultados obtidos por $\cos(45^\circ)$ ou por $\sin(45^\circ)$ permite converter os valores para a direção do movimento do CECO.

Para além desta consideração e, sabendo que os resultados dos movimentos, no AQWA, são sempre relativos à posição do centro de gravidade do respetivo corpo, é ainda indispensável ajustar os resultados finais para que o eixo de simetria do respetivo gráfico se situe sobre o eixo dos x. Apenas assim é possível realizar uma comparação válida com os valores obtidos em modelação física.

A Figura (5.18) apresenta os resultados para os quatro testes efetuados.

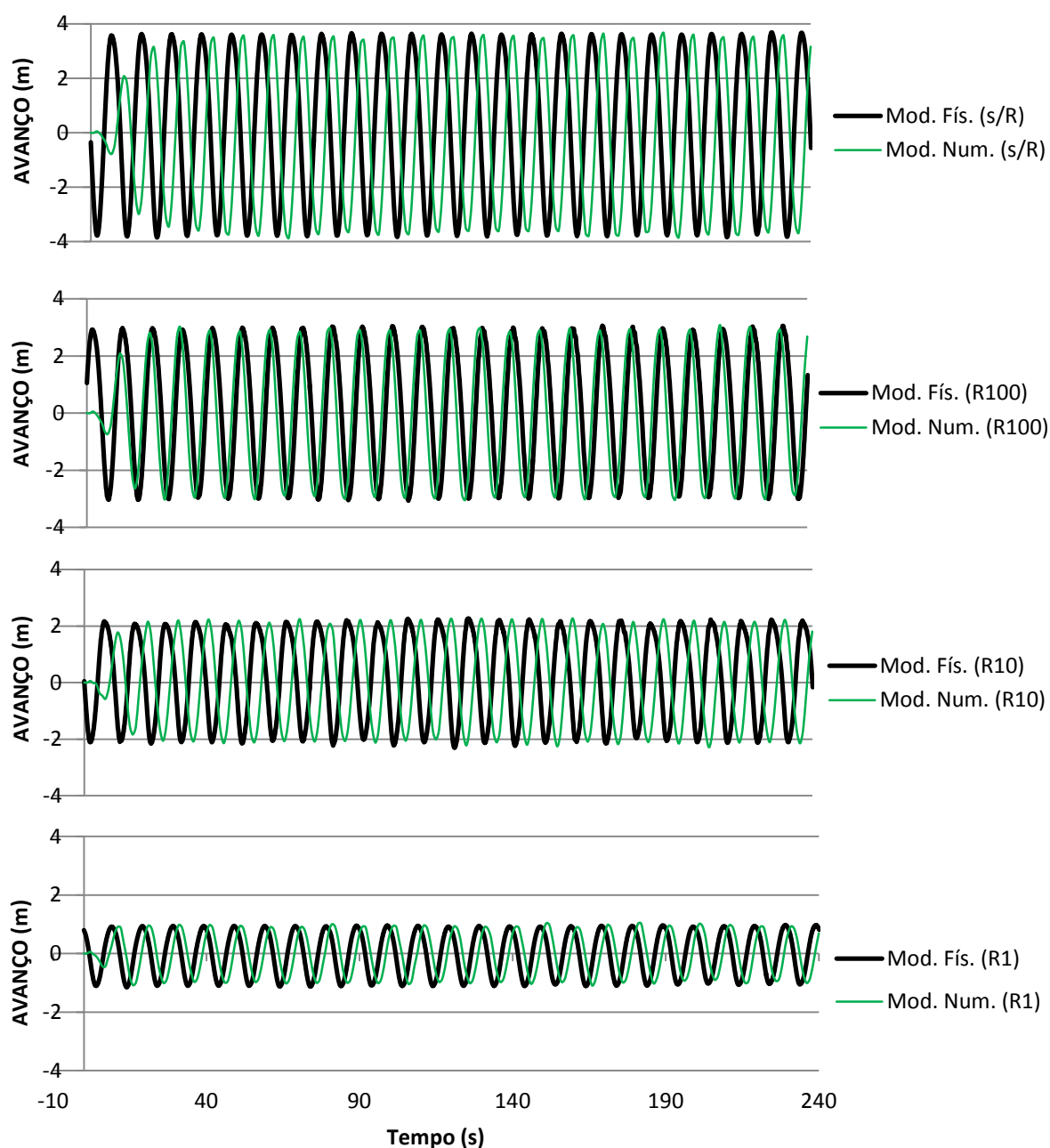


Figura 5.18 – Comparação dos deslocamentos entre o modelo físico e o modelo numérico

Conforme se pode verificar, a concordância dos resultados é extremamente satisfatória. Importa ainda frisar que, em termos comparativos, não tem interesse procurar analisar e verificar uma sobreposição perfeita dos gráficos, uma vez, conforme seria de esperar, os tempos de arranque do dispositivo serão necessariamente diferentes, no modelo físico e no modelo numérico. A constatação da concordância é efetuada através da comparação da oscilação do movimento e, acima de tudo, da amplitude do mesmo.

O Quadro (5.1) apresenta os valores obtidos para a amplitude do movimento, para cada teste, tanto na modelação física como na modelação numérica.

Quadro 5.1 – Comparação da amplitude dos movimentos entre o modelo físico e o modelo numérico

Teste	Amplitude Modelo Físico (m)	Amplitude Modelo Numérico (m)	Diferença (m)	Diferença (%)
Sem amortecimento	7.528	7.503	0.025	0.120
Com amortecimento (R100)	6.125	6.116	0.009	0.156
Com amortecimento (R10)	4.578	4.567	0.011	0.236
Com amortecimento (R1)	2.129	2.132	0.003	0.167

Tal como se pode observar, a maior disparidade ocorre no teste com um grau de amortecimento associado a uma resistência externa de 10 Ohms, com uma discrepância de 0.236%, o que traduz uma diferença de 11 cm, numa amplitude de movimento superior a 4.5 m. Estes resultados validam a calibração do modelo numérico.

Tendo em vista desenvolvimentos futuros do CECO utilizando o modelo numérico AQWA, importa ainda apresentar os valores definidos para o atrito e para o amortecimento, nos quatro testes (Quadro 5.2).

Quadro 5.2 – Valores definidos no AQWA, para o atrito e o amortecimento

Teste	Atrito [kN.m]	Amortecimento (x) [(kN.m)/(°/s)]	Amortecimento (z) [(kN.m)/(°/s)]
Sem amortecimento	160000	0	0
Com amortecimento (R100)	160000	267500	267500
Com amortecimento (R10)	160000	1050000	1050000
Com amortecimento (R1)	160000	3990000	3990000

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente dissertação pretendeu dar continuidade ao trabalho de Teixeira (2012) e de Marinheiro (2013), sobre o CECO, dispositivo conversor da energia cinética das ondas. Tendo por base os resultados obtidos na modelação física do CECO, procurou-se avançar para a modelação numérica, permitindo que o dispositivo continuasse o seu desenvolvimento.

A modelação numérica do dispositivo CECO permite, estando o modelo devidamente validado com resultados obtidos experimentalmente, analisar novas condições de teste e otimizar o dispositivo. De facto, com a geometria e o comportamento do dispositivo corretamente reproduzidos, torna-se razoavelmente simples, alterando as condições de teste ou mesmo as características de alguns componentes do dispositivo, realizar novos testes, procurando otimizar o desempenho do CECO.

Em primeiro lugar, procurou-se, no presente trabalho, compreender a teoria na qual se baseia o pacote numérico "*ANSYS Academic Research Offshore/Marine*", que abreviadamente se designa por AQWA. Desta forma, foi possível, numa segunda fase, entender a abordagem e os métodos utilizados pelo mesmo, para diferentes análises, bem como as suas capacidades e limitações. Esta primeira fase mereceu especial destaque, tendo-se revelado fundamental para a compreensão e consequente manejo do modelo numérico, principalmente se for tido em conta que este foi o primeiro trabalho desenvolvido na FEUP, com o modelo AQWA.

Assim, o primeiro caso de estudo preliminar permitiu compreender a forma como este modelo lida com a simulação de elementos esbeltos, cujas características se enquadram nas condições de aplicação da fórmula de Morison. Conforme já foi referido, no AQWA estas estruturas devem ser definidas como elementos lineares, cuja geração não é possível de ocorrer dissociada de estruturas fixas. Isto implica que sejam introduzidas perturbações no escoamento, em torno das mesmas estruturas, o que pode provocar ligeiras alterações nos resultados finais das diferentes análises, principalmente quando comparados com casos em que essas estruturas alongadas são analisadas isoladamente. No entanto e, tendo em conta as condições reais em que se encontram este tipo de elementos, a verdade é que, na grande maioria das vezes, os mesmos se encontram associados a estruturas de volume considerável. Desta forma e, tendo em conta que o caso de estudo preliminar referente ao pilar é meramente teórico, entende-se que esta condicionante do AQWA não representa qualquer desvantagem competitiva do modelo, perante outros que, eventualmente, permitam a simulação isolada destes elementos.

Ainda no que diz respeito à construção de elementos lineares, importa referir que o AQWA apresenta uma diversidade considerável de secções transversais possíveis de definir para os mesmos. No entanto, não é possível definir, para uma mesma estrutura reticulada, diferentes secções transversais em

simultâneo. De facto, enquanto na modelação física a interação entre elementos alongados com secções transversais diferentes pode ser resolvida com a solidarização dos mesmos, na modelação numérica, utilizando o modelo AQWA, tal não é possível. Esta é uma conclusão importante, uma vez que, por diversas ocasiões, como no caso do dispositivo CECO, esta restrição impõe condições de análise ligeiramente diferentes, entre o modelo físico e o modelo numérico.

Dito isto, é de salientar que esta primeira abordagem possibilitou adquirir um conhecimento alargado sobre o modo de gerar e analisar elementos esbeltos no AQWA, o que representa um passo bastante positivo e enriquecedor, principalmente se for tido em conta que, por analogia, o mesmo conhecimento pode ser aplicado na construção do dispositivo CECO no modelo numérico.

Por seu lado, o segundo caso de estudo preliminar permitiu compreender, em primeira instância, os diferentes *outputs* possíveis de retirar, no AQWA, através de uma análise de corpos flutuantes. Para além disto e, talvez ainda mais importante, foi possível compreender com algum detalhe as diferentes opções e alternativas para a geração de uma malha, bem como as implicações que essas definições introduzem na solução posterior. Este é era um dos objetivos fundamentais, uma vez que, conforme foi referido anteriormente, a definição e consequente qualidade da malha afeta decisivamente a precisão dos resultados obtidos para cada análise.

Desta forma, a realização prévia dos dois casos iniciais revelou-se bastante útil, uma vez que permitiu abordar, com maior segurança e agilidade, a modelação do dispositivo CECO. De facto, a construção geométrica dos diferentes componentes e as suas condições de ligação foram realizadas sem grande dificuldade, tirando partido do conhecimento retirado nos dois casos de estudo preliminares e das capacidades, bastante abrangentes, quer do *Design Modeler*, quer do próprio modelo (*Model*).

Posto isto, merece ainda destaque a forma como foi possível, no AQWA, reproduzir o movimento de translação verificado no dispositivo CECO. Tendo em conta que o modelo não permite a criação de um movimento de translação puro, foi necessário contornar o problema, através da definição de um movimento de rotação, com raio suficientemente grande para que, num espaço de análise reduzido, o movimento fosse praticamente coincidente com um movimento de translação. Esta forma permitiu reproduzir adequadamente o movimento oblíquo desejado.

Finalmente, foi ainda possível alcançar o derradeiro passo desta dissertação que contemplou a calibração do modelo numérico utilizado, tendo por base os resultados obtidos na última fase de testes no modelo físico, para três graus de amortecimento introduzido pelo PTO. Ultrapassado este passo, torna-se relativamente simples alterar as características geométricas do dispositivo, as características do PTO ou as condições de teste, tendo em vista a otimização do desempenho do dispositivo CECO. Desta forma, é importante referir algumas das etapas futuras que o dispositivo deverá experimentar.

Neste contexto, terá assim interesse efetuar uma análise detalhada do desempenho global do dispositivo CECO, para diferentes geometrias e graus de submersão dos módulos laterais móveis, inclinações do dispositivo e níveis de amortecimento introduzidos pelo sistema de extração de energia.

Será ainda importante estudar um sistema de amarração adequado para instalações do CECO em águas mais profundas, onde seja técnica e economicamente inviável a utilização de um elemento de suporte cravado no fundo do oceano. Com efeito, estando a eficiência deste dispositivo diretamente relacionada com os movimentos relativos entre as componentes móveis (MLM's) e um elemento central, onde se encontra alojado o sistema de extração de energia, importa que esse elemento central se encontre fixo ou, eventualmente, se movimente em oposição de fase com os componentes móveis, aumentando assim a amplitude desses movimentos relativos.

Por fim, será também pertinente efetuar uma análise das condições de sobrevivência do dispositivo perante condições de agitação mais energéticas, típicas de temporais marítimos.

Em suma, esta dissertação permitiu adquirir um conhecimento importante sobre o modelo numérico AQWA, desde a teoria em que se baseia, até ao tipo de *outputs* possíveis de retirar, passando, naturalmente, pela forma de definir os diferentes elementos e as condições de teste a que estes estão sujeitos. O facto de este ser o primeiro trabalho, realizado na FEUP, a abordar este pacote numérico, dá ainda especial relevo às barreiras vencidas e às conclusões obtidas. Neste campo, é de destacar ainda que, em termos de exigências computacionais, nomeadamente no que diz respeito ao tempo necessário para efetuar completamente uma simulação, o AQWA apresenta uma eficiência bastante elevada, sendo capaz de resolver casos complexos em relativamente pouco tempo.

Finalmente, faz ainda sentido mencionar que, com o modelo numérico devidamente validado e calibrado, se espera que seja possível realizar no futuro novos testes com o dispositivo CECO, que permitam avançar rapidamente para um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas otimizado, capaz de alcançar a curto/médio prazo as derradeiras etapas do seu desenvolvimento.

Bibliografia

- André, R. A. (2010). “*Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto.
- ANSYS (2012a). *AQWA Theory Manual, Release 15.0*, Pennsylvania, USA.
- ANSYS (2012b). *AQWA User Manual, Release 14.5*, Pennsylvania, USA.
- ANSYS (2012c). *AQWA Reference Manual, Release 14.5*, Pennsylvania, USA.
- ANSYS (2012d). *AQWA Hydrodynamic Diffraction, Introduction to ANSYS AQWA, Workshop 2.3*, Pennsylvania, USA.
- ANSYS (2012e). *AQWA Articulations, Introduction to ANSYS AQWA, Workshop 2.1*, Pennsylvania, USA.
- ANSYS (2011). *Design Modeler User Guide, Release 14.0*, Pennsylvania, USA
- APREN. (2010). *Roteiro Nacional de Energias Renováveis, Aplicação da Diretiva 2009/28/CE - Versão Final*. Renewable Energy Policy Action Paving the Way Towards 2020.
- Biesheuvel, A. C. (2013). *Effectiveness of Floating Breakwaters – Wave Attenuating Floating Structures*. Master of Science Thesis. Delft University of Technology. Netherlands.
- BMT (2001). *Review of model testing requirements for FPSO's. Offshore Technology, Report 2000/123*, BMT, Fluid Mechanics Ltd, Teddington, United Kingdom, 72p. ISBN:0-7176-2046-8.
- Burcharth, H., Frigaard, P. (1989). *Wave Loads on Cylinders*. CEEC COMETT Seminar on Wave and Ice Forces on offshore structures, University of Aalborg, Denmark.
- Chakrabarti, S. K. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures*. WIT Press. Southampton, UK.
- Chakrabarti, S. K. (2000). *Empirical Calculation of roll damping for ships and barges*. Technical note. Ocean Engineering. USA.
- Child, B. (2011). *On the Configuration of Arrays of Floating Wave Energy Converters*. Thesis submitted to the degree of Doctor, Edinburgh University, Scotland.
- Cruz, J. (2008). *Ocean Wave Energy - Current Status and Future Perspectives*, ISBN 978-3-540-74895-3, Bristol, UK.
- Cruz, J. e Sarmento, A. (2004). *Energia das ondas: Introdução aos Aspetos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*. Instituto do Ambiente, Alfragide.
- Cunha, J. F. e Onofrei, R. (2008). *Energia Oceânica*. Instituto Nacional de Propriedade Industrial, Lisboa.
- Demirbilek, Z. e Linwood, V. (2008). *Water Wave Mechanics*. Chapter 1, Part II, Coastal Engineering Manual, EM 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- European Commission (2014). *Blue Energy, Action needed to deliver the potential of ocean energy in European seas and oceans by 2020 and beyond*, Brussels, Belgium.
- Falcão, A. (2009). *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Wave Energy Utilization: A review of the technologies*. Elsevier.

- Falcão, A. (2012). *An Introduction to Wave and Tidal Energy*. 4th Coastlab Teaching School, Wave and Tidal energy, FEUP, Porto.
- Falnes, J. (2007). *A Review of Wave-Energy Extraction*, Elsevier, Marine Structures.
- Haritos, N. (2007). *Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures– An Overview*. EJSE Special Issue: Loading on Structures.
- Heller, V. (2012). *Technology Readiness Level approach for the development of WEC's*. 4th CoastLab Teaching School, Wave and Tidal Energy, FEUP, Porto.
- Hong, K. (2012). *Current Status, Future Perspective and Development Strategy of Marine Renewable Energy Technologies*. International Symposium on Advanced Marine Technologies. South Korea.
- International Energy Agency (2013). *World Energy Outlook, Executive Summary*, Paris, France.
- Li, Y. e Yu, I. (2012). *A Synthesis of Numerical Methods for Modeling Wave Energy Converter-Point Absorbers*. National Renewable Energy Laboratory. USA
- Marinheiro, J. (2013). “*Estudo de Otimização de um Dispositivo Inovador para o Aproveitamento da Energia das Ondas*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Hidráulica, FEUP, Porto.
- Martins, M.D. (2009). “*Sistemas de Aproveitamento da Energia do Mar*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Oortmerssen, G. (1976). *The Motions of a Moored Ship in Waves*. PhD Thesis. Delft University of Technology. Netherlands.
- Offshore Engineering Group, (2005). *Lecture on Offshore Hydromechanics, Module 4*. Delft University of Technology, Netherlands.
- Paredes, G. (2008). “*Estudo experimental de um sistema Offshore para a produção de energia das ondas*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Hidráulica, FEUP, Porto.
- PIANC (1995). “*Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours*”. *A Practical Guide*. Report of Working Group no. 24. Supplement to Bolletín no. 88. Dansk Institut.
- Piccinini, F. (2008). *Carregamento Hidrodinâmico sobre uma Estrutura Cilíndrica Esbelta Proveniente de Ondas e Correntes Oceânicas*. Revista da Engenharia de Instalações no Mar. Brasil.
- Pinkster, J.A. e Oortmerssen, G. (1977). *Computation of the First and Second Order Wave Forces on Oscillating Bodies*. 2nd International Conference Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley.
- REN. (2013). *A Energia Eólica em Portugal 2012*.
- Rosa Santos, P. (2010). “*Análise da Interação de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração. Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões, Volume I*”, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Rosa Santos, P.; Taveira-Pinto, F.; Teixeira, L.; Ribeiro J. (2014a). “*CECO wave energy converter: concept and physical model tests*”, 3rd IAHR Europe Congress, Porto, Portugal.
- Sajonia, C.B. (1988). *Random Wave Forces on a Free-to-Surge Vertical Cylinder*. Thesis in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Texas A&M University, US.
- Santos, J.A. (1993). “*Modelação Numérica do Comportamento de Navios Amarrados*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.
- Sarmiento, A. (2012). “*A Engenharia e a Tecnologia nas Energias Renováveis Offshore*.” Ingenium.

Sarpkaya, T. (1976). “*Vortex shedding and resistance in harmonic flow about smooth and rough cylinders*”. 1st International Conference on the behavior of offshore structures (BOSS '76) 1, 220-235, The Norwegian Institute of Technology.

SI-OCEAN, (2012). “Ocean Energy: State of the Art”. Technology Status Report. SI OCEAN - strategic initiative for ocean energy (IEE co-funded project 2012-2014), December 2012, 78p.

Taveira Pinto, F. (2012). *Agitação Irregular*. Apontamentos de Trabalhos Marítimos 2: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.

Taveira Pinto, F., Veloso-Gomes, F. e Carneiro de Barros, R. (1985). *Agitação Marítima Irregular*. Revisão 1996. Laboratório de Hidráulica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.

Teixeira, L. (2012). “*Estudo Experimental de um Novo Dispositivo de Aproveitamento da Energia das Ondas*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Hidráulica, FEUP, Porto.

Veloso-Gomes, F. (2012). *Agitação Marítima*. Apontamentos de Trabalhos Marítimos 1: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.

Veloso-Gomes, F. (1985). *Resistência Hidrodinâmica de Elementos Estruturais*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Laboratório de Hidráulica, Porto.

World Energy Council (2013). *World Energy Resources, 2013 Survey*, London, UK

World Energy Council (2013). *World Energy Scenarios, Composing energies futures to 2050*, London, UK

[1] <http://www.energiaportugal.pt/pt/energia-em-portugal>

[2] <http://geospatial.blogs.com/geospatial/2012/07/new-eu-energy-efficiency-directive-to-address-20-20-shortfall.html>

[3] <http://www.apren.pt/pt/dados-tecnicos-3/dados-nacionais-2/producao-2/a-producao-da-pre-renovavel-em-portugal-2/2-1-evolucao-da-producao-de-electricidade-pre-renovavel-em-portugal-entre-1999-e-2013-c-correcao-de-hidraulicidade/>

[4] <http://www.apren.pt/pt/dados-tecnicos-3/dados-nacionais-2/producao-2/a-producao-de-electricidade-em-portugal-2/1-6-evolucao-do-peso-da-electricidade-de-origem-renovavel-em-portugal-entre-1999-e-2013-com-correcao-de-hidraulicidade/>

[5] <http://wildeanalysis.co.uk/contact>

ANEXOS

ANEXO A

CÁLCULOS MANUAIS DAS FORÇAS DE INÉRCIA E DE RESISTÊNCIA TENDO POR BASE A FÓRMULA DE MORISON

Conforme foi referido anteriormente, os cálculos manuais das forças de inércia e de resistência foram realizados com auxílio do Microsoft Excel. Neste anexo apresentam-se as forças obtidas, não só através da formulação direta, como através do cálculo indireto, discriminadas ao longo do pilar, em sub-trechos de 1 m.

O Quadro (A. 1) apresenta os resultados obtidos diretamente através das equações que resultam da integração das forças e momentos ao longo de toda a extensão do pilar, para a força total (F_{T1}) e para o momento (M_{MT1}), respetivamente, na base do pilar, a uma profundidade (d) de 25 m.

Quadro A. 1 – Força e momento total na base de um pilar de 25 m (cálculo direto).

d (m)	F_{T1} / M_{T1}	Fase (rad)				
		0π	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
25.0 m	F_{T1} (kN/m)	5.415	1.648	-5.415	-1.648	2.707
	M_{T1} (kN.m/m)	82.148	22.783	-82.148	-22.783	82.148

Relativamente ao cálculo indireto, o pilar foi dividido em sub-trechos de 1 m de altura. A força por unidade de comprimento foi calculada tendo por base valores de velocidade e de aceleração determinados através das fórmulas (2.7 e 2.8) e (2.11 e 2.12), respetivamente.

Os valores da velocidade oscilaram entre 0.77 m/s, no topo, e os 0.41 m/s, na base do pilar. Por seu turno, a aceleração alcançou um valor máximo de 0.48 m/s^2 , no topo do pilar, e os 0.26 m/s^2 , na base do mesmo.

De acordo com este método, a força total é constituída pelo somatório das forças de inércia e das forças de resistência. O Quadro (A. 2) apresenta os resultados obtidos para as forças de inércia ao longo do pilar através do cálculo indireto, tendo por base a aplicação da fórmula de Morison a cada sub-trecho de 1 m de altura.

Quadro A. 2 – Força de inércia ao longo do pilar, no centro de cada sub-trecho de 1.0 m

Z (m)	F_i (kN/m)				
	Fase (rad)				
	0π	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
0.50	0.000	0.097	0.000	-0.097	0.000
-0.50	0.000	0.093	0.000	-0.093	0.000
-1.50	0.000	0.090	0.000	-0.090	0.000
-2.50	0.000	0.086	0.000	-0.086	0.000
-3.50	0.000	0.083	0.000	-0.083	0.000
-4.50	0.000	0.080	0.000	-0.080	0.000
-5.50	0.000	0.077	0.000	-0.077	0.000
-6.50	0.000	0.075	0.000	-0.075	0.000
-7.50	0.000	0.072	0.000	-0.072	0.000
-8.50	0.000	0.070	0.000	-0.070	0.000
-9.50	0.000	0.068	0.000	-0.068	0.000
-10.50	0.000	0.066	0.000	-0.066	0.000
-11.50	0.000	0.064	0.000	-0.064	0.000
-12.50	0.000	0.062	0.000	-0.062	0.000
-13.50	0.000	0.061	0.000	-0.061	0.000
-14.50	0.000	0.059	0.000	-0.059	0.000
-15.50	0.000	0.058	0.000	-0.058	0.000
-16.50	0.000	0.057	0.000	-0.057	0.000
-17.50	0.000	0.056	0.000	-0.056	0.000
-18.50	0.000	0.055	0.000	-0.055	0.000
-19.50	0.000	0.054	0.000	-0.054	0.000
-20.50	0.000	0.054	0.000	-0.054	0.000
-21.50	0.000	0.053	0.000	-0.053	0.000
-22.50	0.000	0.053	0.000	-0.053	0.000
-23.50	0.000	0.053	0.000	-0.053	0.000
-24.50	0.000	0.052	0.000	-0.052	0.000

O Quadro (A. 3) apresenta os resultados obtidos para as forças de inércia ao longo do pilar pelo cálculo indireto, tendo por base a fórmula de Morison.

Quadro A. 3 – Força de resistência ao longo do pilar, no centro de cada sub-trecho de 1.0 m

Z (m)	F_D (kN/m)				
	Fase (rad)				
	0π	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
0.50	0.453	0.000	-0.453	0.000	0.453
-0.50	0.418	0.000	-0.418	0.000	0.418
-1.50	0.386	0.000	-0.386	0.000	0.386
-2.50	0.358	0.000	-0.358	0.000	0.358
-3.50	0.331	0.000	-0.331	0.000	0.331
-4.50	0.308	0.000	-0.308	0.000	0.308
-5.50	0.286	0.000	-0.286	0.000	0.286
-6.50	0.267	0.000	-0.267	0.000	0.267
-7.50	0.250	0.000	-0.250	0.000	0.250
-8.50	0.234	0.000	-0.234	0.000	0.234
-9.50	0.220	0.000	-0.220	0.000	0.220
-10.50	0.207	0.000	-0.207	0.000	0.207
-11.50	0.196	0.000	-0.196	0.000	0.196
-12.50	0.186	0.000	-0.186	0.000	0.186
-13.50	0.176	0.000	-0.176	0.000	0.176
-14.50	0.168	0.000	-0.168	0.000	0.168
-15.50	0.161	0.000	-0.161	0.000	0.161
-16.50	0.155	0.000	-0.155	0.000	0.155
-17.50	0.150	0.000	-0.150	0.000	0.150
-18.50	0.145	0.000	-0.145	0.000	0.145
-19.50	0.141	0.000	-0.141	0.000	0.141
-20.50	0.138	0.000	-0.138	0.000	0.138
-21.50	0.135	0.000	-0.135	0.000	0.135
-22.50	0.134	0.000	-0.134	0.000	0.134
-23.50	0.132	0.000	-0.132	0.000	0.132
-24.50	0.132	0.000	-0.132	0.000	0.132

Finalmente, o Quadro (A. 4) apresenta a força total, obtida através do somatório das forças de inércia e de resistência.

Quadro A. 4 – Somatório das forças de inércia e de resistência (F_T), ao longo do pilar

Z (m)	F_T (kN/m)				
	Fase (rad)				
	0π	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
0.50	0.453	0.097	-0.453	-0.097	0.453
-0.50	0.418	0.093	-0.418	-0.093	0.418
-1.50	0.386	0.090	-0.386	-0.090	0.386
-2.50	0.358	0.086	-0.358	-0.086	0.358
-3.50	0.331	0.083	-0.331	-0.083	0.331
-4.50	0.308	0.080	-0.308	-0.080	0.308
-5.50	0.286	0.077	-0.286	-0.077	0.286
-6.50	0.267	0.075	-0.267	-0.075	0.267
-7.50	0.250	0.072	-0.250	-0.072	0.250
-8.50	0.234	0.070	-0.234	-0.070	0.234
-9.50	0.220	0.068	-0.220	-0.068	0.220
-10.50	0.207	0.066	-0.207	-0.066	0.207
-11.50	0.196	0.064	-0.196	-0.064	0.196
-12.50	0.186	0.062	-0.186	-0.062	0.186
-13.50	0.176	0.061	-0.176	-0.061	0.176
-14.50	0.168	0.059	-0.168	-0.059	0.168
-15.50	0.161	0.058	-0.161	-0.058	0.161
-16.50	0.155	0.057	-0.155	-0.057	0.155
-17.50	0.150	0.056	-0.150	-0.056	0.150
-18.50	0.145	0.055	-0.145	-0.055	0.145
-19.50	0.141	0.054	-0.141	-0.054	0.141
-20.50	0.138	0.054	-0.138	-0.054	0.138
-21.50	0.135	0.053	-0.135	-0.053	0.135
-22.50	0.134	0.053	-0.134	-0.053	0.134
-23.50	0.132	0.053	-0.132	-0.053	0.132
-24.50	0.132	0.052	-0.132	-0.052	0.132

ANEXO B

RESULTADOS PARA A ALTERAÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE DA BARCAÇA PARA (0, 0, -1)

Conforme foi referido em (4.3.4.6), a alteração da posição do centro de gravidade para uma profundidade de 1 m, para além de ter implicado melhorias nas comparações dos resultados em que se verificaram maiores diferenças, também não introduziu qualquer discrepância nova nos gráficos em que a comparação era já satisfatória. As Figuras (B.1) a (B.20).

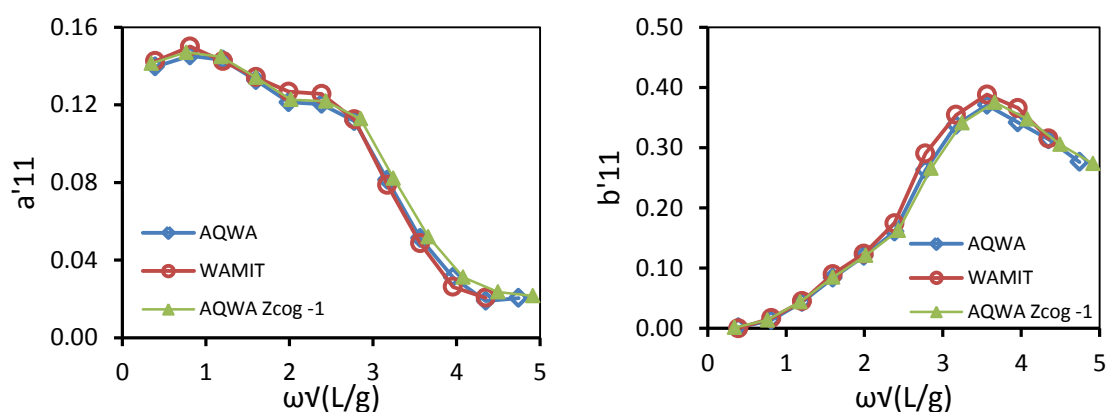


Figura B.1 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de avanço.
Barcaça Livre. Profundidade 50m.

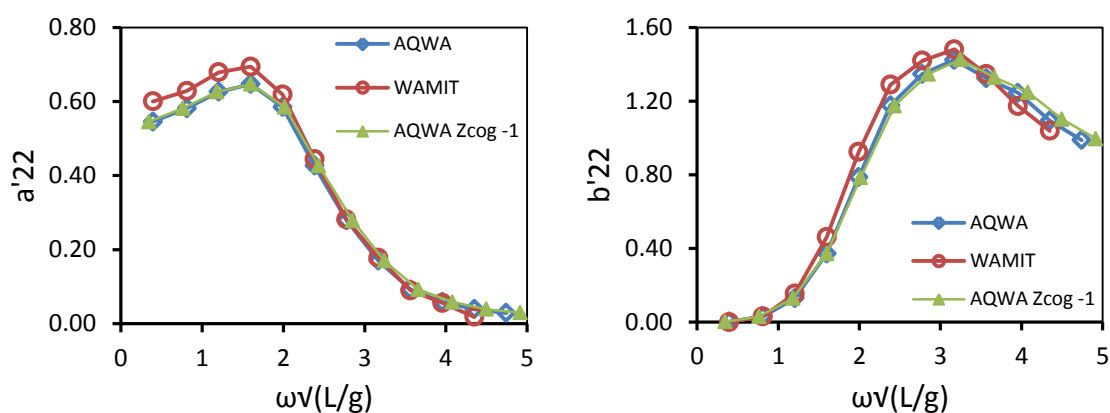


Figura B.2 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de deriva.
Barcaça Livre. Profundidade 50m.

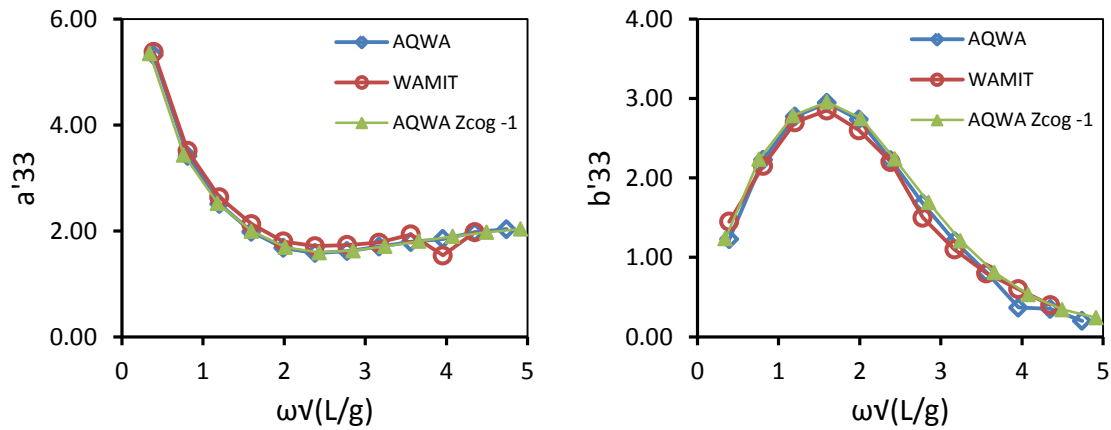


Figura B.3 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de arfagem.
Barça Livre. Profundidade 50m.

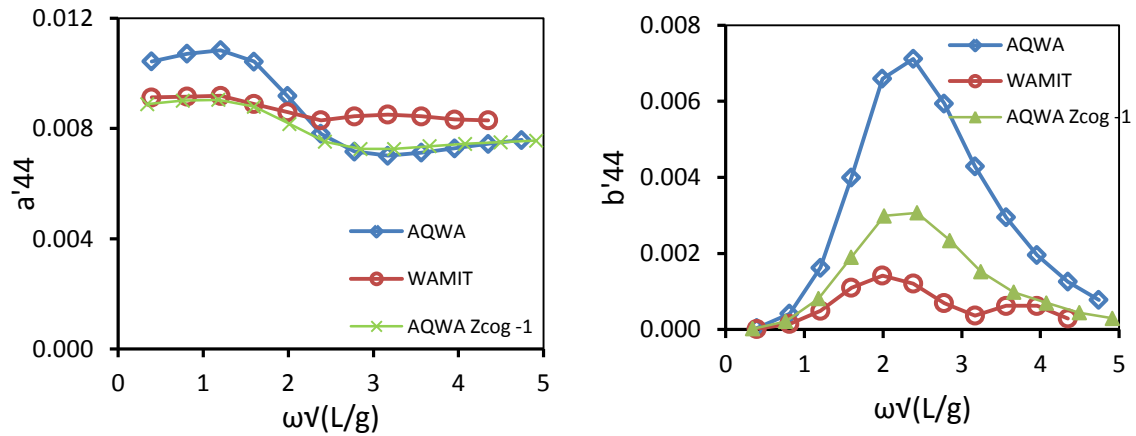


Figura B.4 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de balanço.
Barça Livre. Profundidade 50m

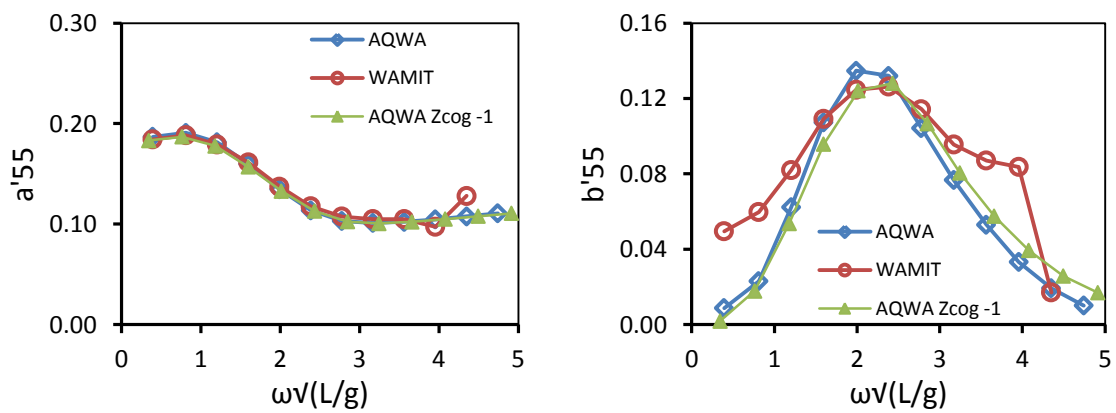


Figura B.5 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de cabeceio.
Barça Livre. Profundidade 50m.

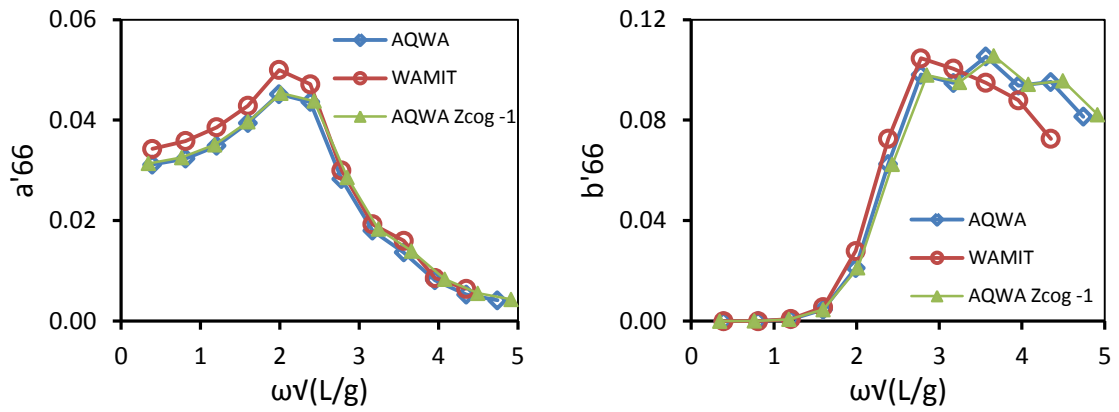


Figura B.6 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de guinada.
Barça Livre. Profundidade 50m.

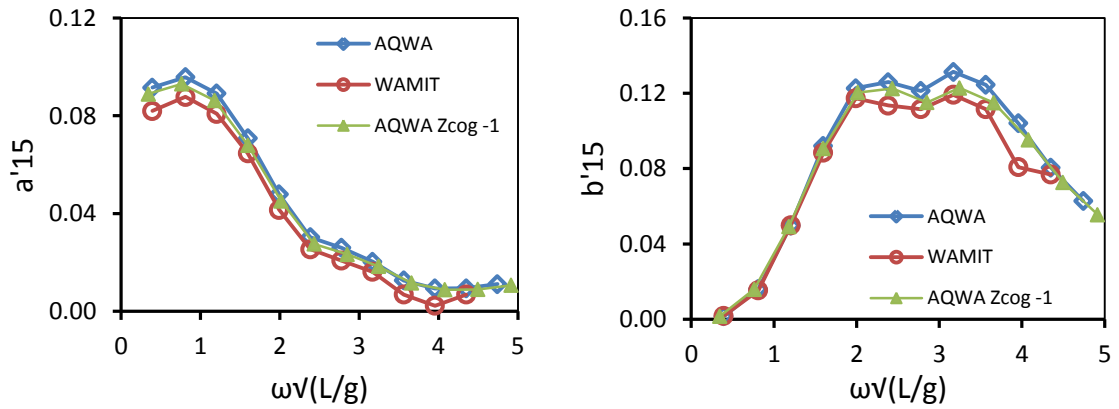


Figura B.7 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o acoplamento entre o modo de avanço e o modo de cabeceio. Barça Livre. Profundidade 50m.

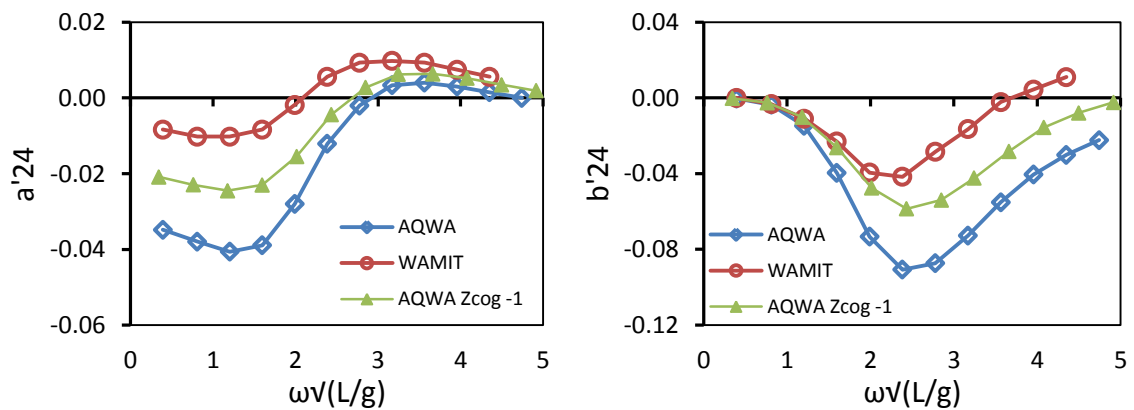


Figura B.8 – Coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o acoplamento entre o modo de deriva e o modo de balanço. Barça Livre. Profundidade 50m.

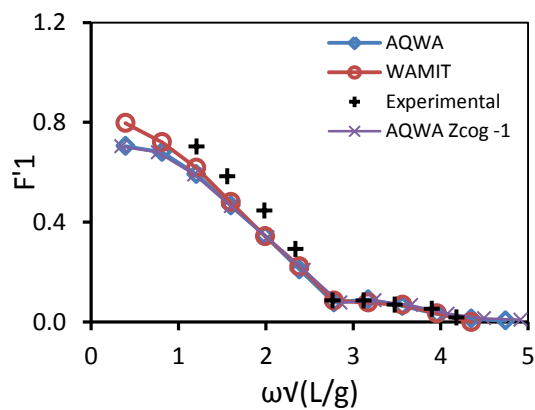


Figura B.9 – Força de excitação para o modo de avanço.

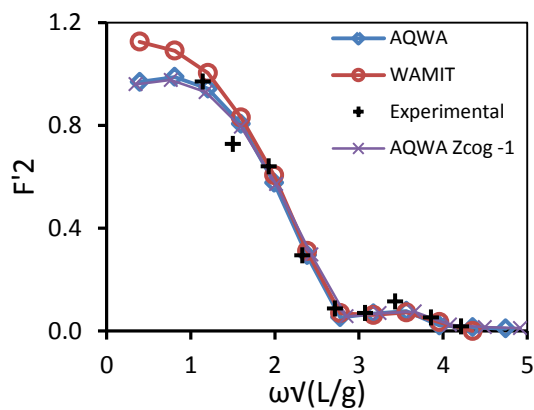


Figura B.10 – Força de excitação para o modo de deriva.

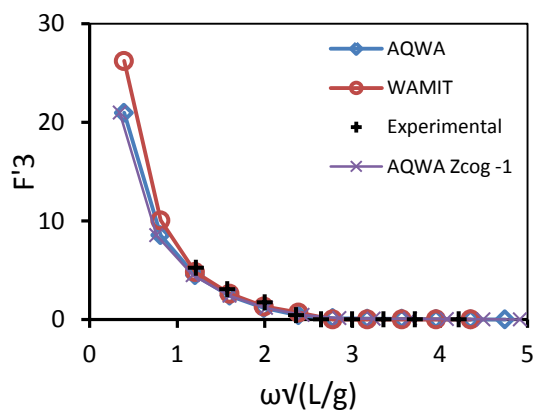


Figura B.11 – Força de excitação para o modo de arfagem.

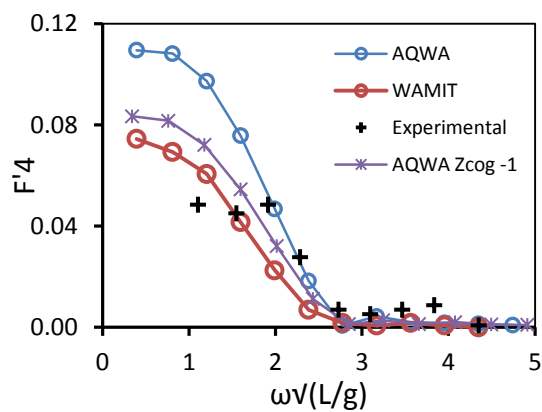


Figura B.12 – Força de excitação para o modo de balanço.

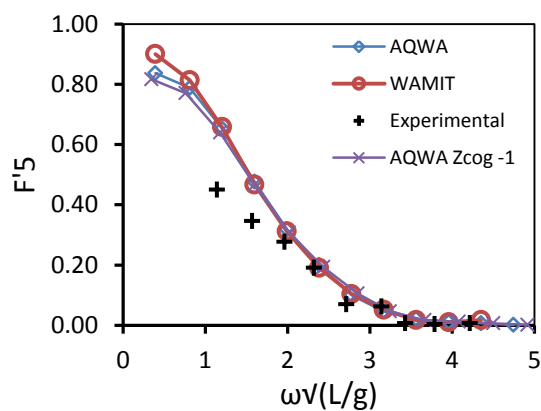


Figura B.13 – Força de excitação para o modo de cabeceio.

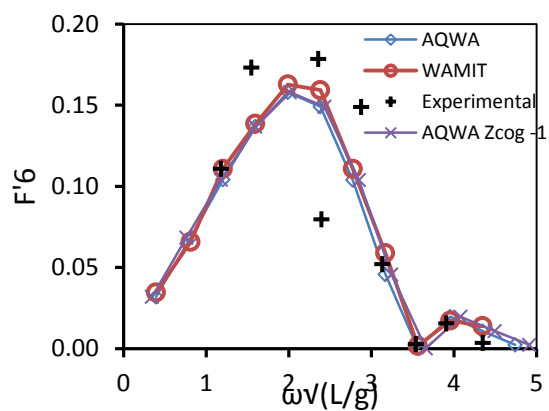


Figura B.14 – Força de excitação para o modo de guinada.

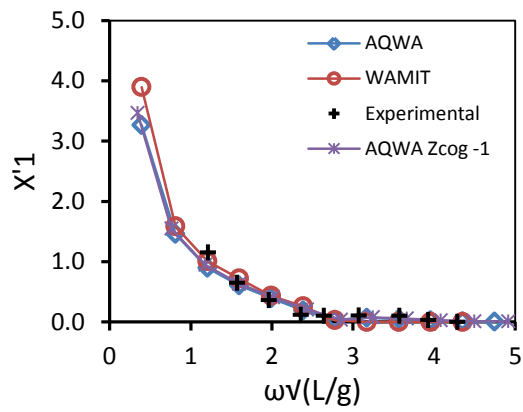


Figura B.15 – Movimentos da barça livre para o modo de avanço.

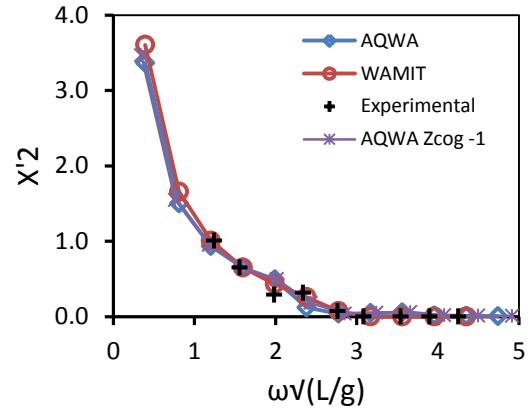


Figura B.16 – Movimentos da barça livre para o modo de deriva.

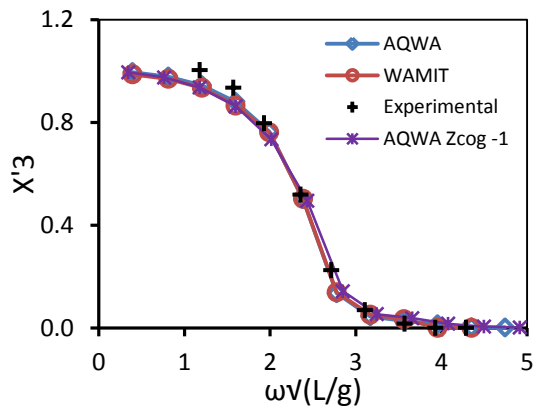


Figura B.17 – Movimentos da barça livre para o modo de arfagem.

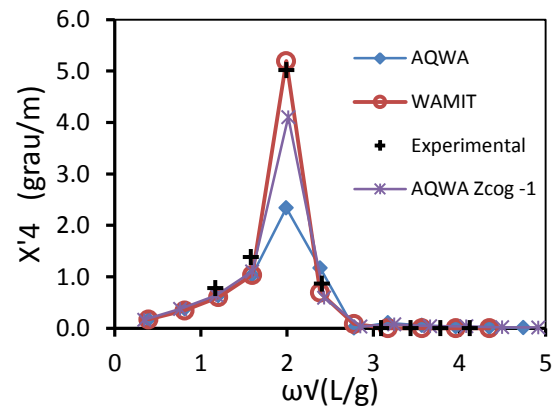


Figura B.18 – Movimentos da barça livre para o modo de balanço.

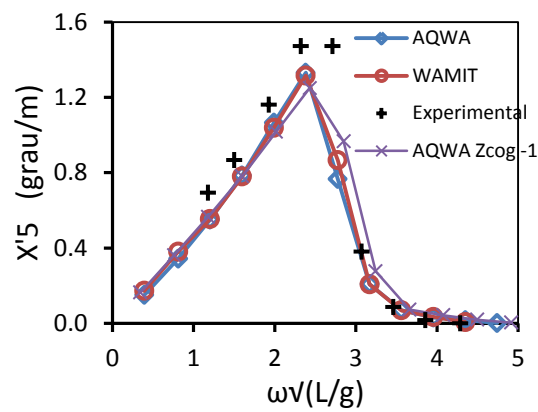


Figura B.19 – Movimentos da barça livre para o modo de cabeceio.

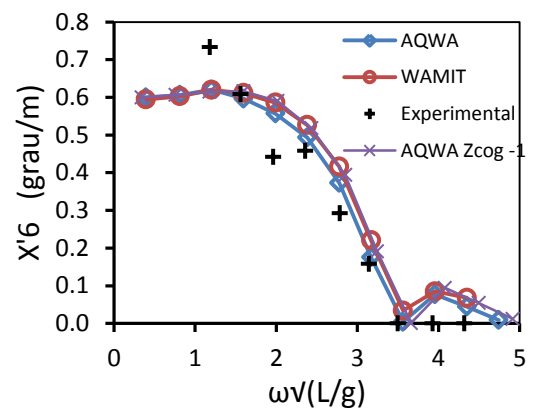


Figura B.20 – Movimentos da barça livre para o modo de guinada.